

# Commande numérique ouverte : interpolation optimisée pour l'usinage 5 axes grande vitesse des surfaces complexes

Soutenance de thèse présentée par :

Xavier Beudaert

Directeur : Christophe Tournier  
Co-encadrant : Sylvain Lavernhe

nom@lurpa.ens-cachan.fr  
LURPA, ENS Cachan, Université Paris Sud

## Contexte

### ■ Fabrication de surfaces complexes par usinage

- secteur aéronautique
- moules et matrices
- prothèses biomédicales

### ■ Spécifications

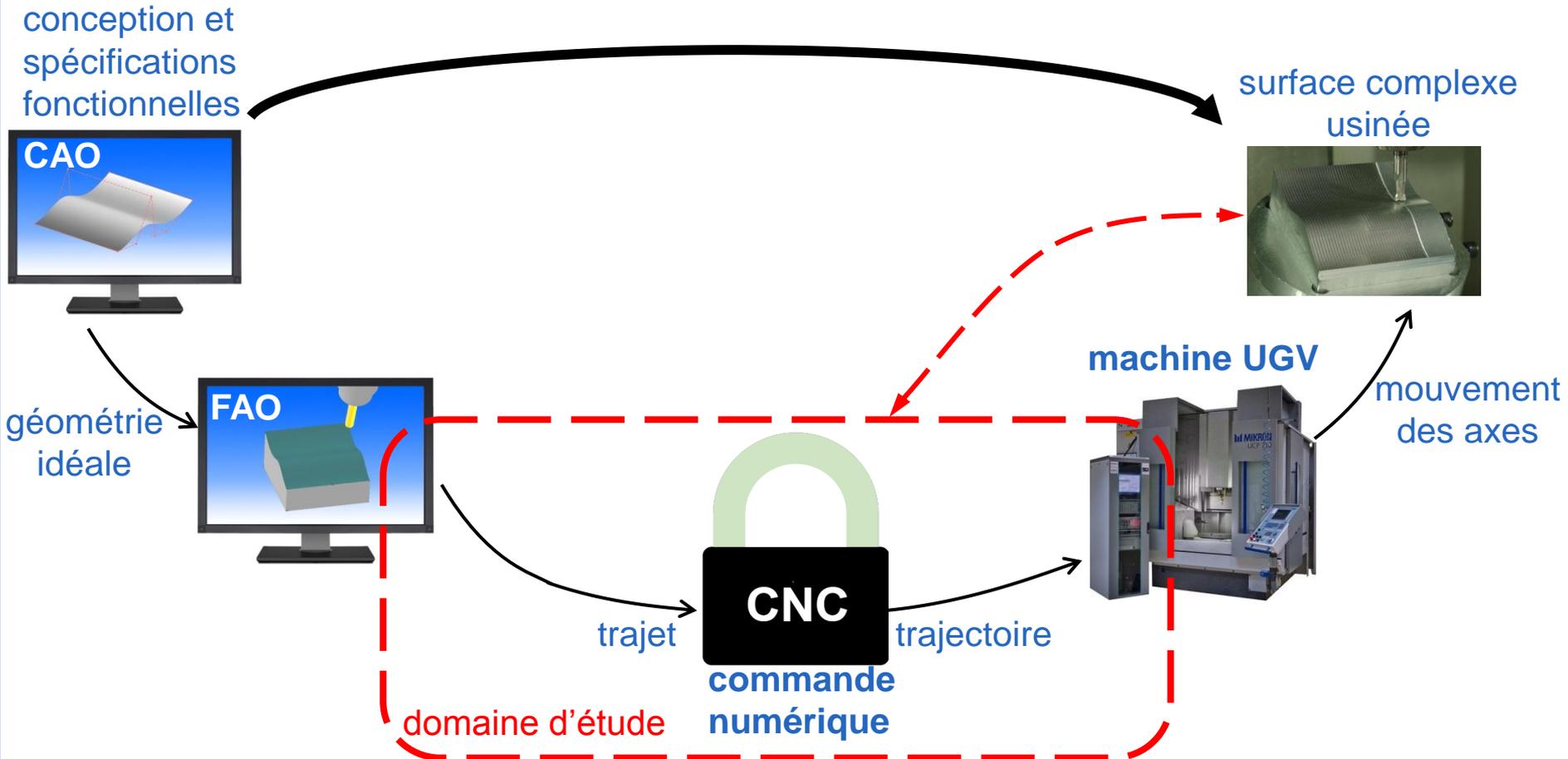
- défaut de forme (macro-géométrie)
- état de surface (micro-géométrie)
- ...



### ■ Le processus d'usinage consiste en

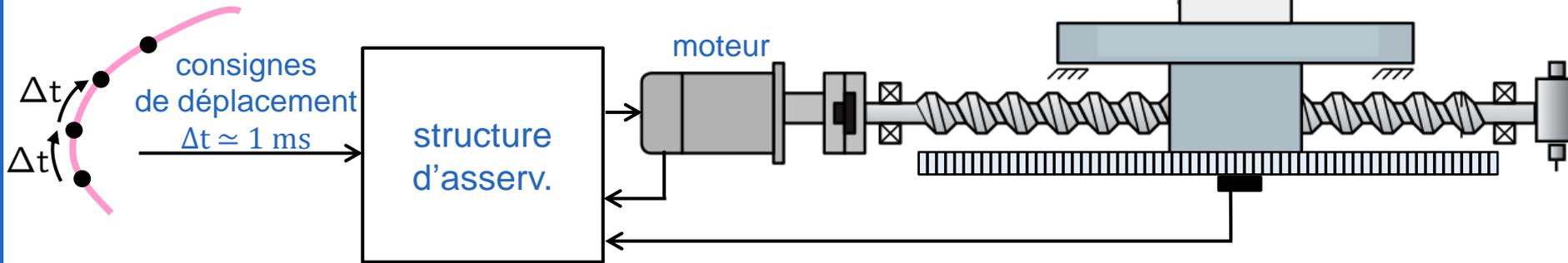
- un mouvement de coupe → enlèvement de la matière
- un mouvement d'avance → déplacement outil/pièce

# Processus de fabrication



**Objectif :** améliorer la qualité et la productivité du processus de fabrication des surfaces

## Mouvement d'un axe



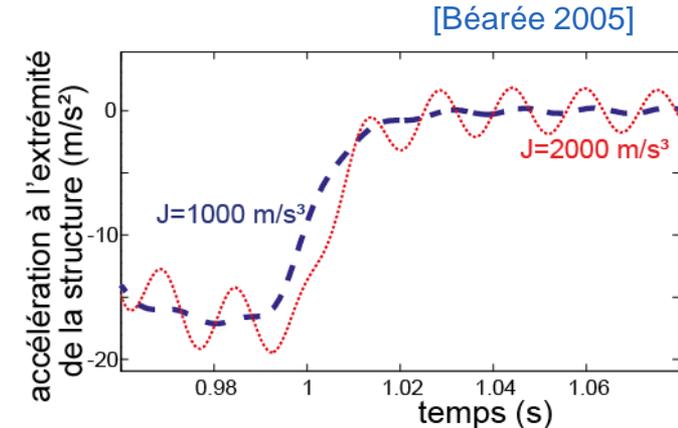
### ■ Mouvements fluides des axes

- éviter les vibrations → dégradation de l'état de surface
  - filtrage des consignes → écart de contour
  - **génération de consignes fluides**

$$\text{masse} \cdot \text{accélération} = \sum \text{forces}$$

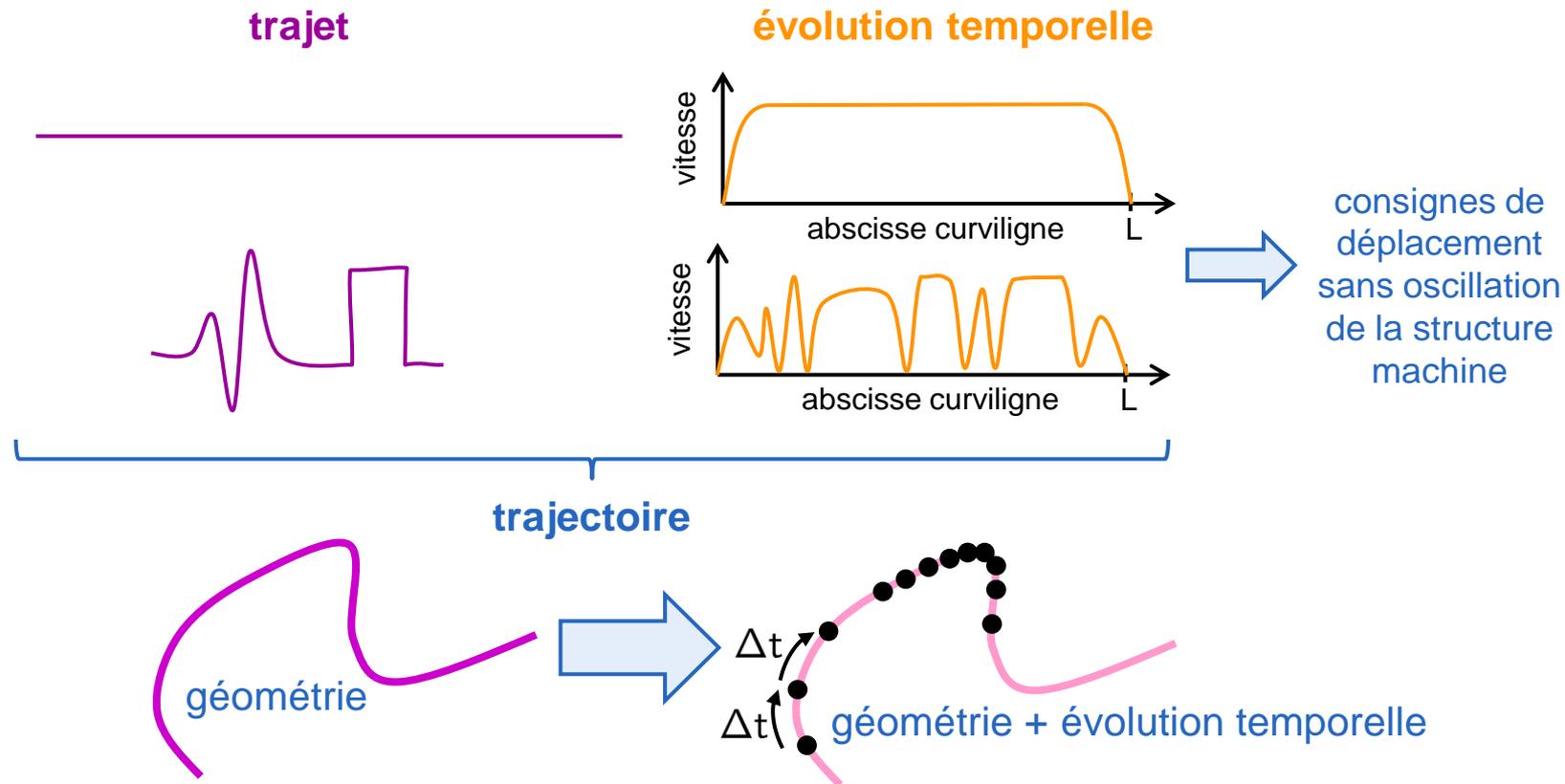
$\Delta_{\text{acc}} \rightarrow \Delta_{\text{Force}}$  (choc) → vibration de la structure

- limitation du **jerk** (dérivée de l'accélération)
  - rigidité de la structure
  - niveau de vibration accepté



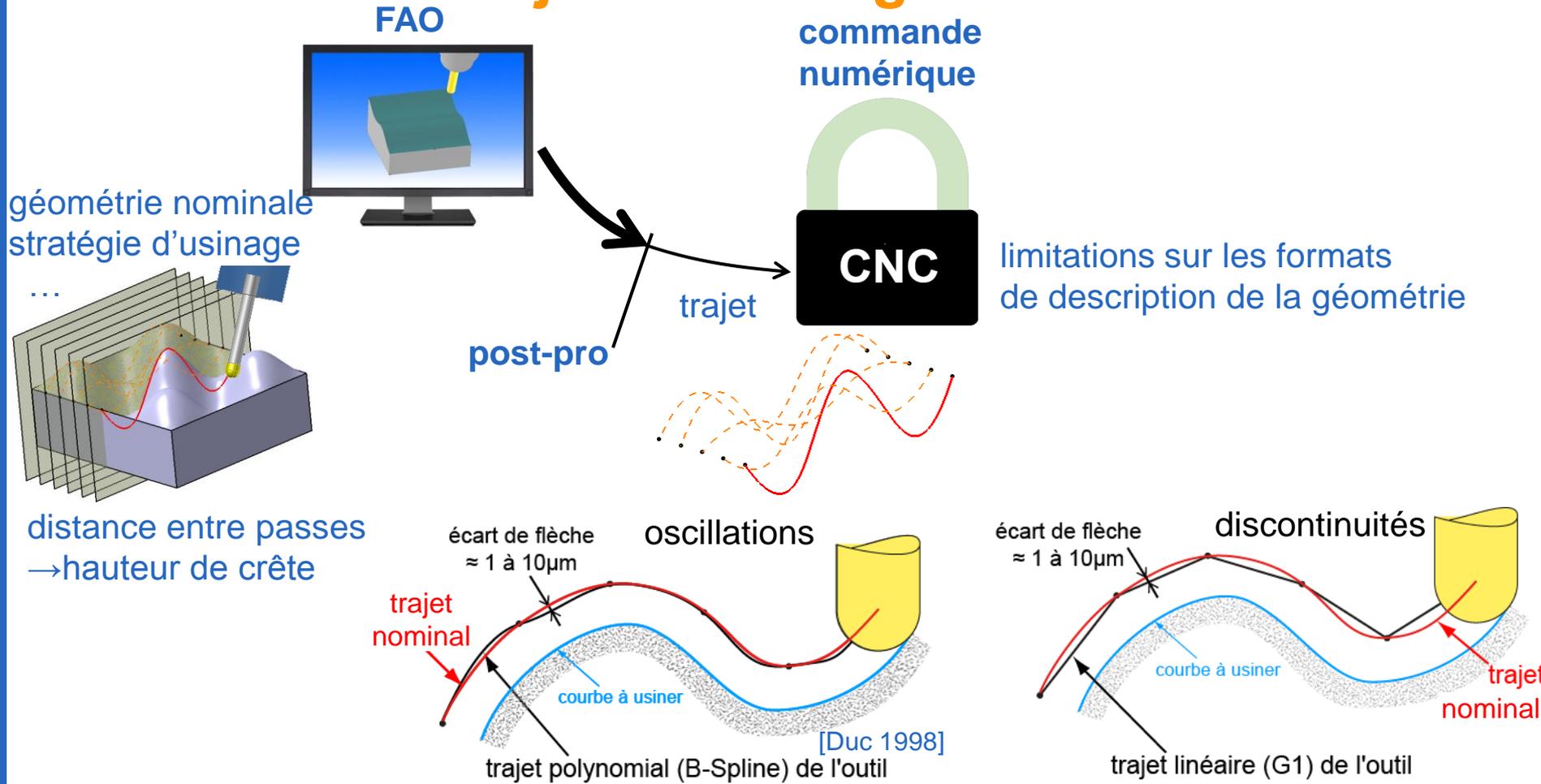
# Fonction principale de la commande numérique

- Créer une trajectoire fluide à partir d'un trajet donné



**Problème: Comment créer une trajectoire fluide à partir d'un trajet donné?**

# Création des trajets d'usinage

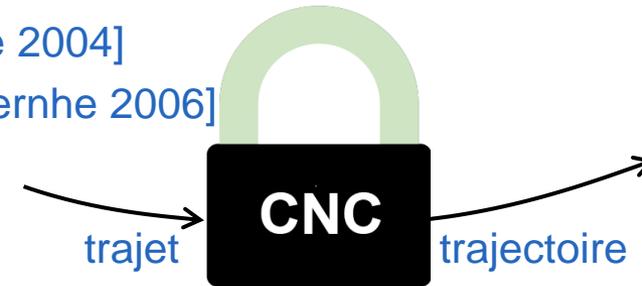


**Problème : - Comment obtenir des trajets d'usinage fluides?**

# Commandes numériques ouvertes

## ■ Limites des commandes numériques industrielles sur

- le format de description des trajets [Duc 1998] [Lartigue 2004]
- la maîtrise des algorithmes internes [Dugas 2002] [Lavernhe 2006]
- les possibilités d'actions temps-réel [Prévost 2011]



**des perspectives d'améliorations sont liées à la maîtrise de la commande numérique et à son intégration dans l'optimisation du processus**

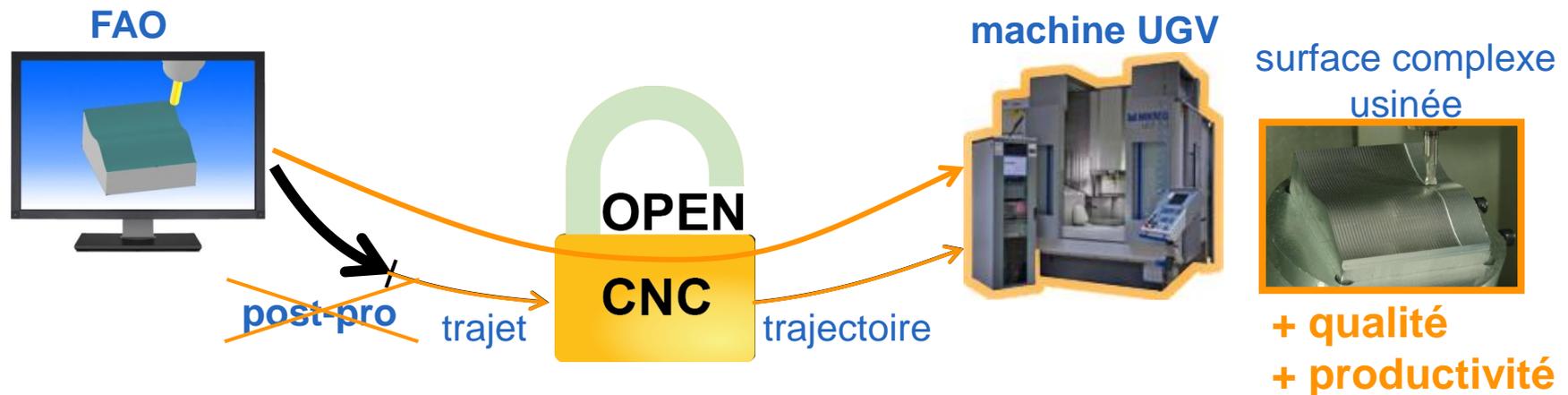
## ■ Des commandes ouvertes pour

- restructurer le processus de fabrication (Step-NC) [Fofdation 2013]
- améliorer les structures d'asservissement [Tsai et al. 2010]
- proposer de nouvelles méthodes d'interpolation [Altintas et al. 2011]

**Objectif : lever les verrous associés aux commandes numériques industrielles**

## Problématiques scientifiques

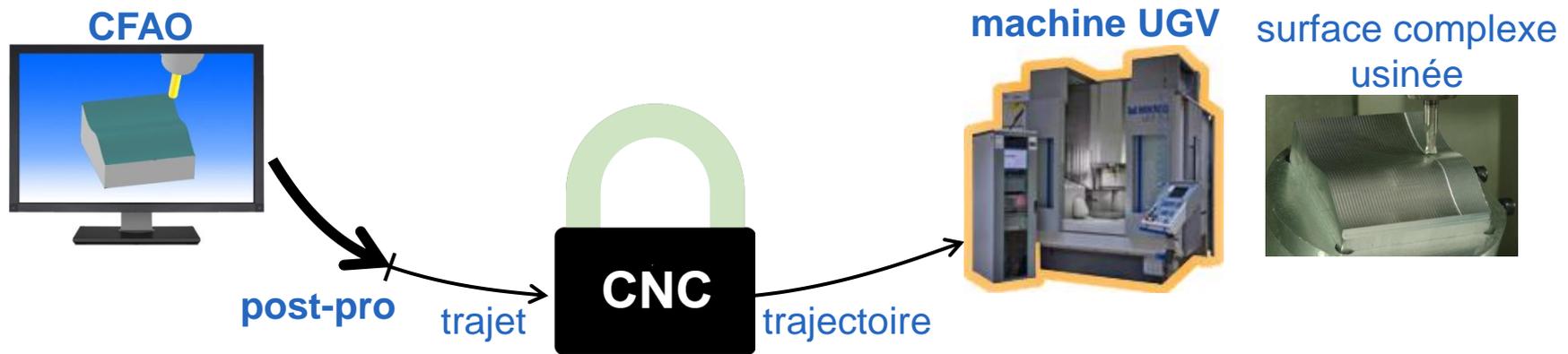
- Comment passer d'un trajet programmé à la trajectoire des axes machine?
  - création des briques de base de la commande numérique ouverte
  - implémentation matériel sur une machine UGV 5 axes – Projet PREMIUM  
Plateforme de **RE**cherche **M**utualisée pour l'**In**novation en **U**sinage **M**ulti-axes



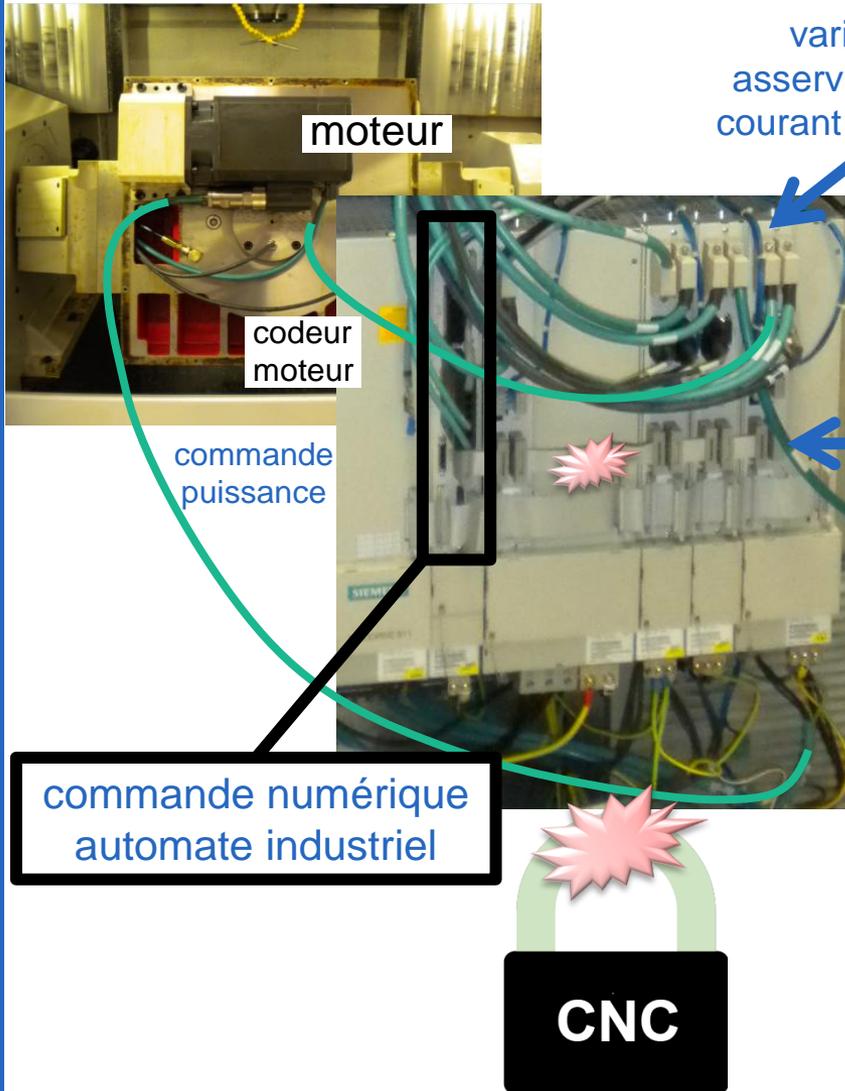
- Comment améliorer l'interpolation des trajectoires pour l'usinage des surfaces complexes?

# Plan

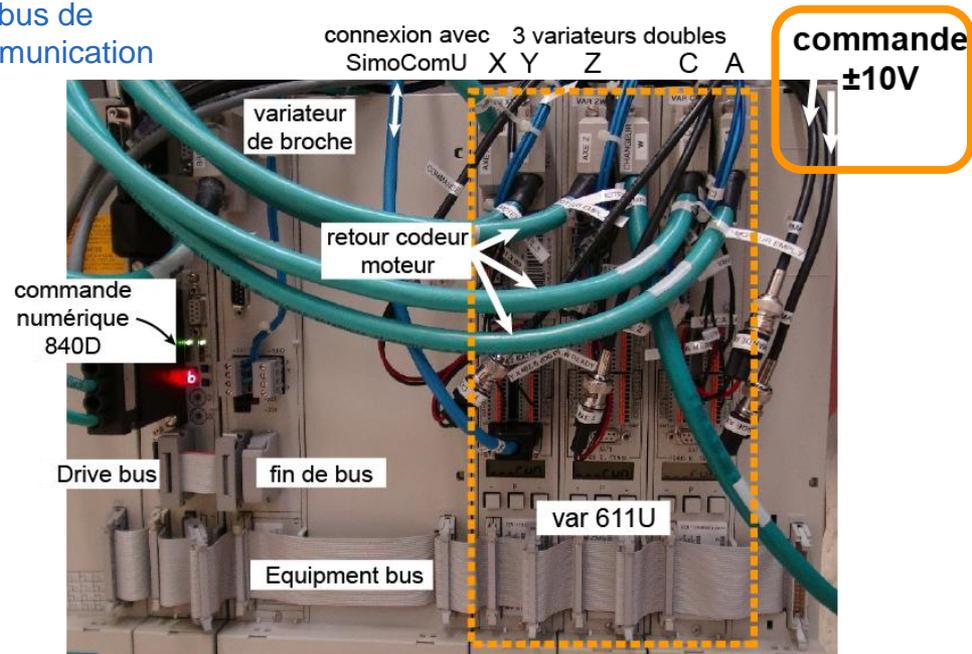
- 1- Introduction
- 2- Commande numérique PREMIUM-OpenCNC
- 3- Interpolation de la trajectoire à jerk limité
- 4- Lissage des trajets 5 axes
- 5- Interpolation de la trajectoire directement sur la surface
- 6- Conclusions et perspectives



# Mouvement des axes d'une machine-outil



## Commande hybride Siemens 840D / PREMIUM-OpenCNC



# Commande PREMIUM-OpenCNC

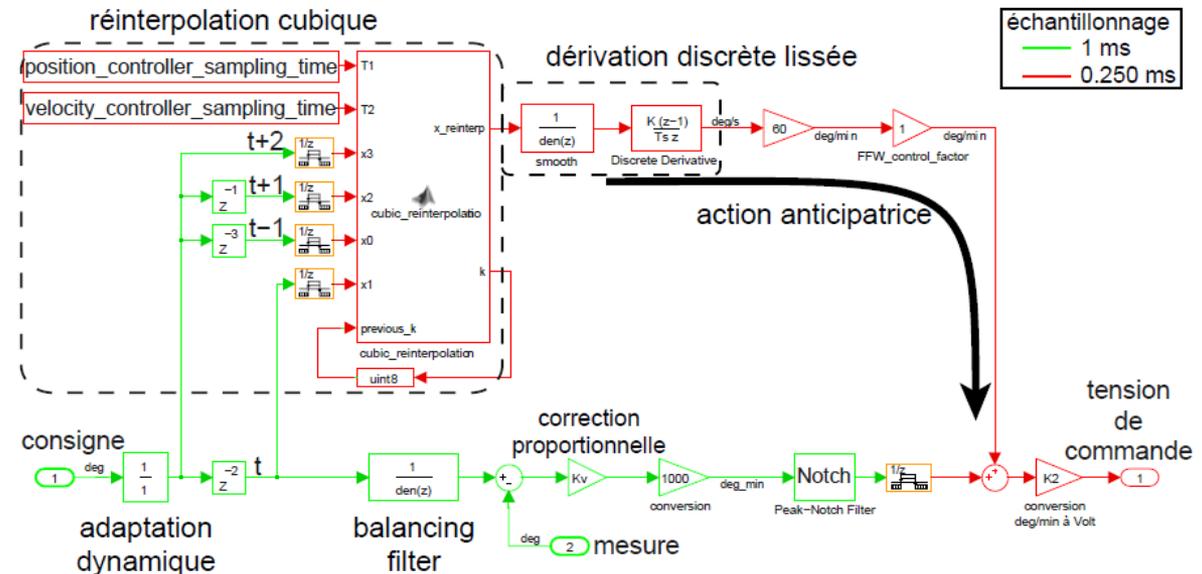
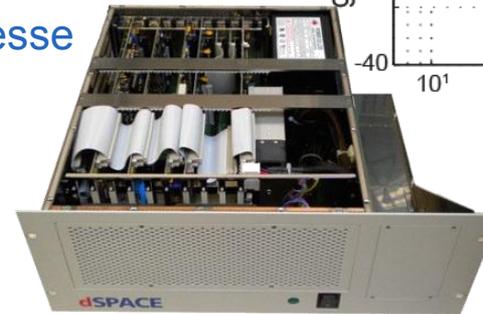
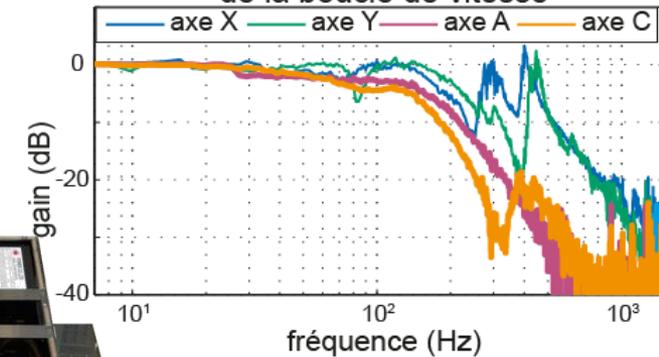
## Asservissement

- identification du comportement dynamique
- implémentation de l'anticipation en vitesse

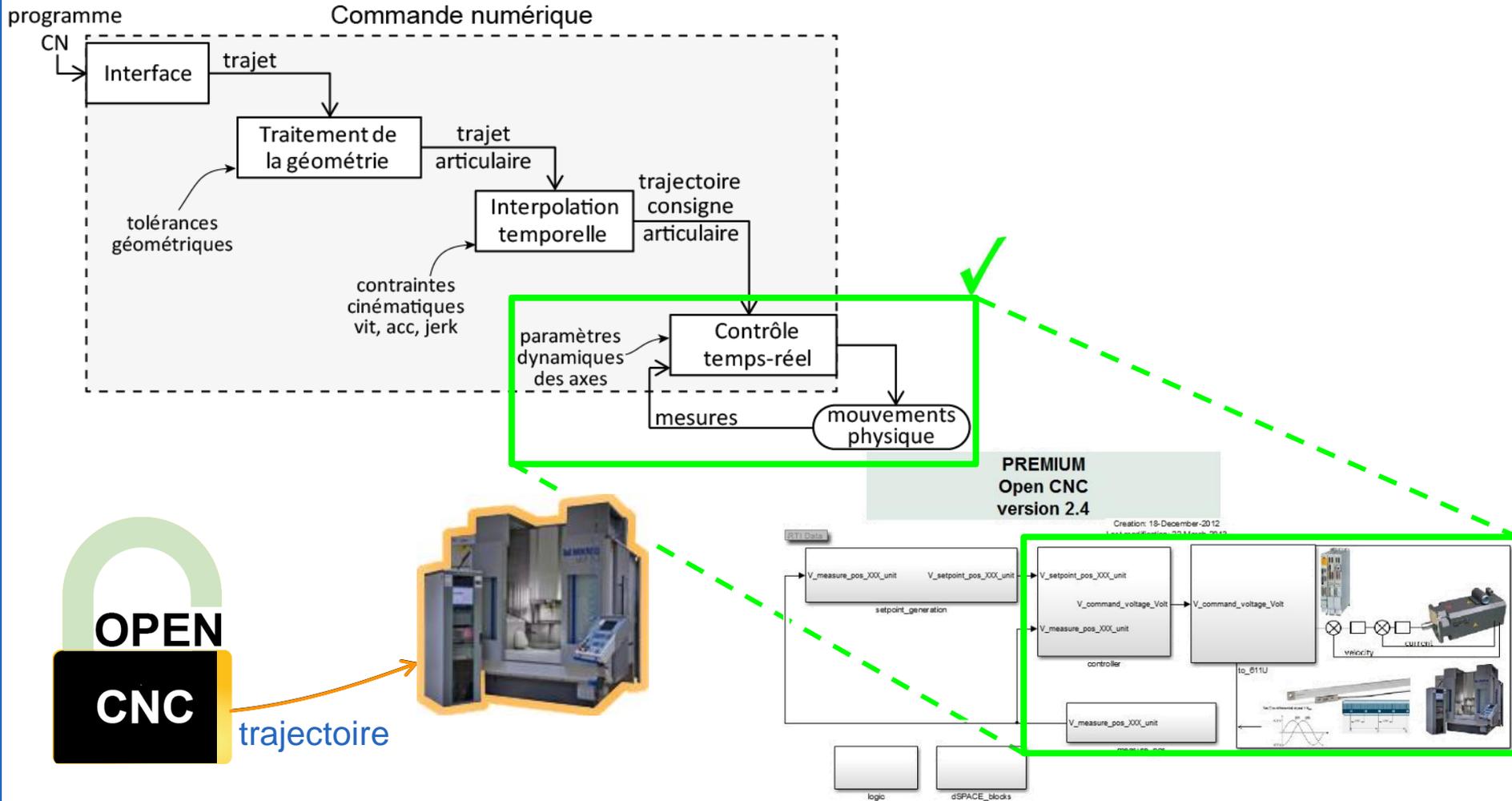
## Calculateur dSPACE

- création du modèle Simulink
- création des interfaces utilisateurs

Réponse fréquentielle  
de la boucle de vitesse



# Architecture de la commande PREMIUM-OpenCNC



⇒ Calcul des consignes de déplacement des axes

# Plan

## 1- Introduction

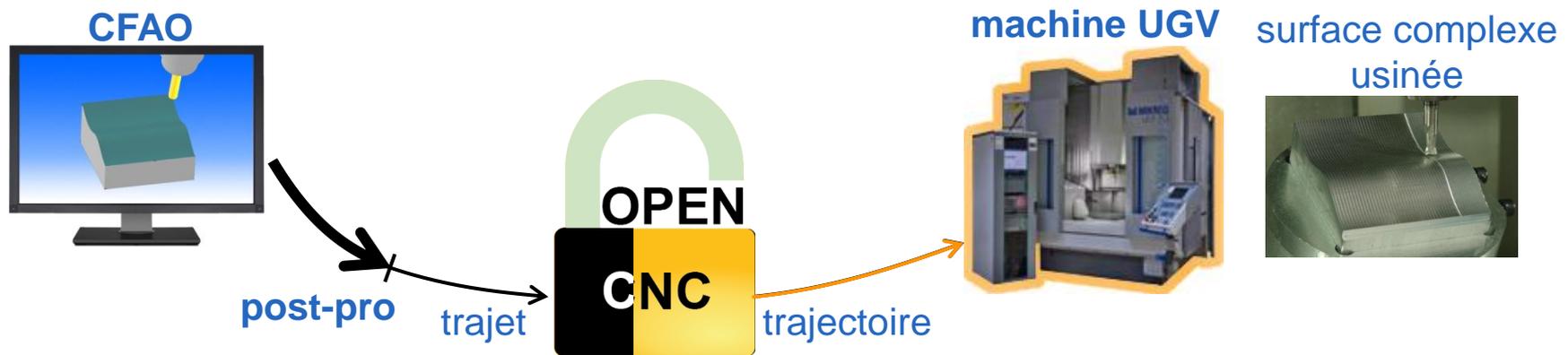
## 2- Commande numérique PREMIUM-OpenCNC

## 3- Interpolation de la trajectoire à jerk limité

## 4- Lissage des trajets 5 axes

## 5- Interpolation de la trajectoire directement sur la surface

## 6- Conclusions et perspectives



# Problème d'interpolation temporelle

- La vitesse d'avance est limitée par les axes

$$\begin{bmatrix} \frac{dX}{dt} \\ \vdots \\ \frac{dC}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{dX}{ds} \\ \vdots \\ \frac{dC}{ds} \end{bmatrix} \frac{ds}{dt} \quad \left| \quad \begin{cases} \dot{q} = q_s \dot{s} & \text{vitesse} \\ \ddot{q} = q_{ss} \dot{s}^2 + q_s \ddot{s} & \text{accélération} \\ \dddot{q} = q_{sss} \dot{s}^3 + 3 q_{ss} \dot{s} \ddot{s} + q_s \dddot{s} & \text{jerk} \end{cases}$$

vitesse = **trajet** . **évolution temporelle**

- Contraintes cinématiques

$$|\dot{q}| \leq V_{\max}^{\text{axes}} \quad ; \quad |\ddot{q}| \leq A_{\max}^{\text{axes}} \quad ; \quad |\dddot{q}| \leq J_{\max}^{\text{axes}}$$

vitesse                      accélération                      jerk

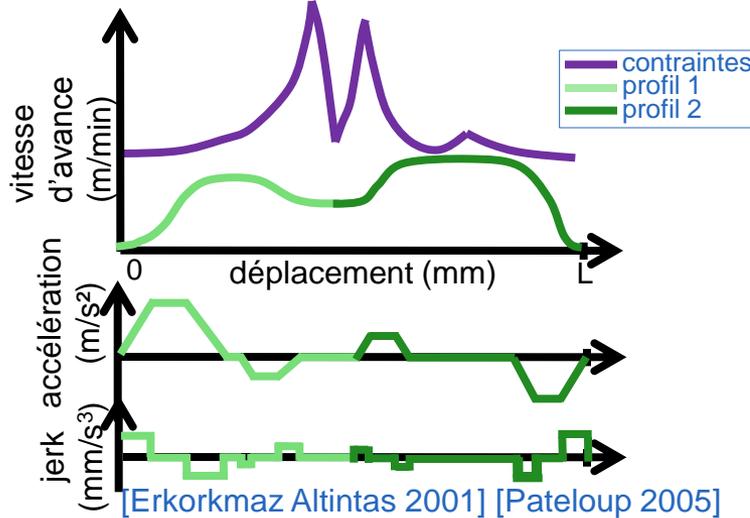
- Objectif : trouver l'évolution temporelle
  - qui respecte les contraintes cinématiques (**jerk**)
  - pour des trajectoires **5 axes**
  - pour des trajets **G1** et **B-Spline**
  - pour n'importe quelle structure de machine



**limitation du  
jerk des axes**

# Interpolation temporelle – étude bibliographique

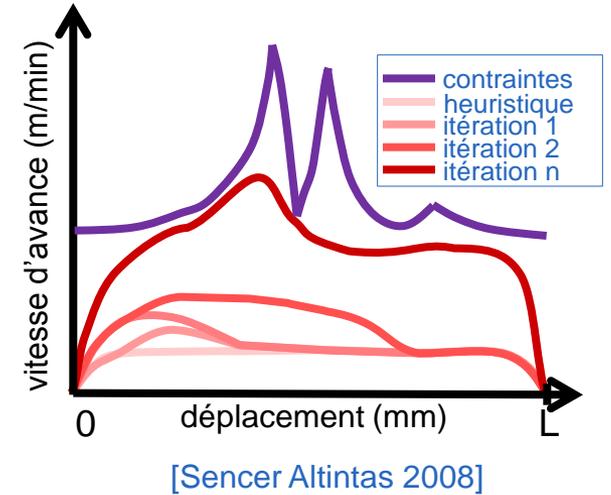
profil prédéfini



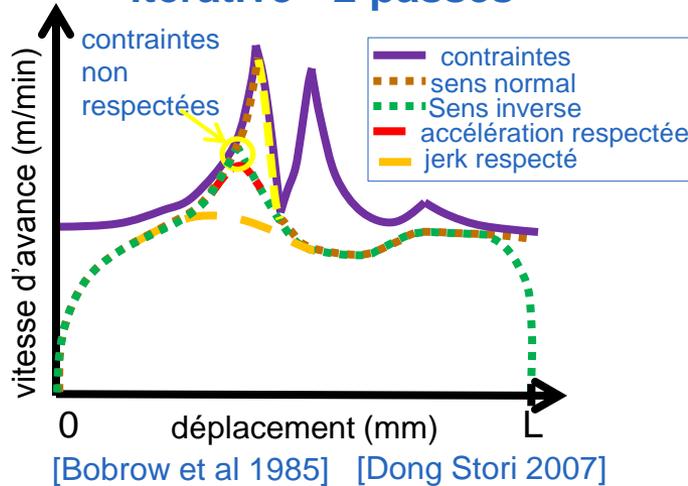
jerk
5 axes
B-Spline
G1

jerk
5 axes
B-Spline
G1

déformation de courbe



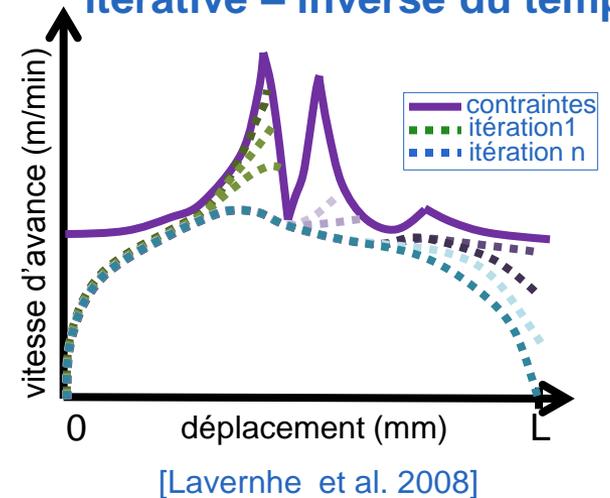
itérative - 2 passes



jerk
5 axes
B-Spline
G1

jerk
5 axes
B-Spline
G1

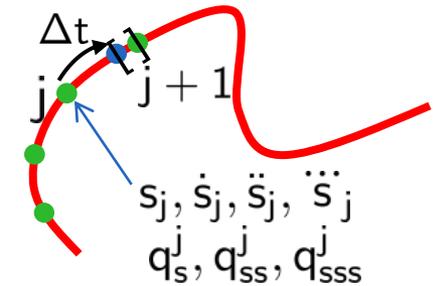
itérative – inverse du temps



# VPOp: Velocity Profile Optimization

$$\begin{cases} \dot{q} = \mathbf{q}_s \dot{s} \\ \ddot{q} = \mathbf{q}_{ss} \dot{s}^2 + \mathbf{q}_s \ddot{s} \\ \dddot{q} = \mathbf{q}_{sss} \dot{s}^3 + 3 \mathbf{q}_{ss} \dot{s} \ddot{s} + \mathbf{q}_s \dddot{s} \end{cases}$$

discrétisation



**ENTREE:**  $s_j, s_{j-1}, s_{j-2}$ , géométrie, limites cinématiques,  $\Delta t, F_{pr}$

mouvement  
outil/pièce

vitesse d'avance



$$0 \leq \dot{s}_{j+1} \leq F_{pr}$$

accélération



$$-A_{\max}^{\tan} \leq \ddot{s}_{j+1} \leq A_{\max}^{\tan}$$

jerk



$$-J_{\max}^{\tan} \leq \dddot{s}_{j+1} \leq J_{\max}^{\tan}$$

mouvement  
des axes

vitesse des axes



$$-V_{\max}^i \leq \dot{q}_{j+1}^i \leq V_{\max}^i$$

accélération des axes



$$-A_{\max}^i \leq \ddot{q}_{j+1}^i \leq A_{\max}^i$$

jerk des axes



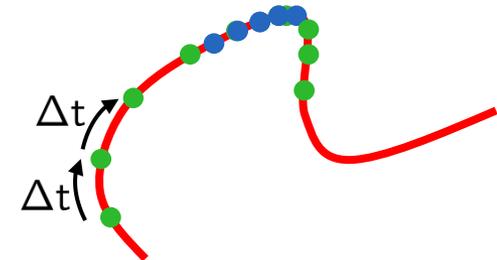
$$-J_{\max}^i \leq \dddot{q}_{j+1}^i \leq J_{\max}^i$$

} x n axes

**SORTIE:**

$$s_{j+1} \in [s_{\min}, s_{\max}]$$

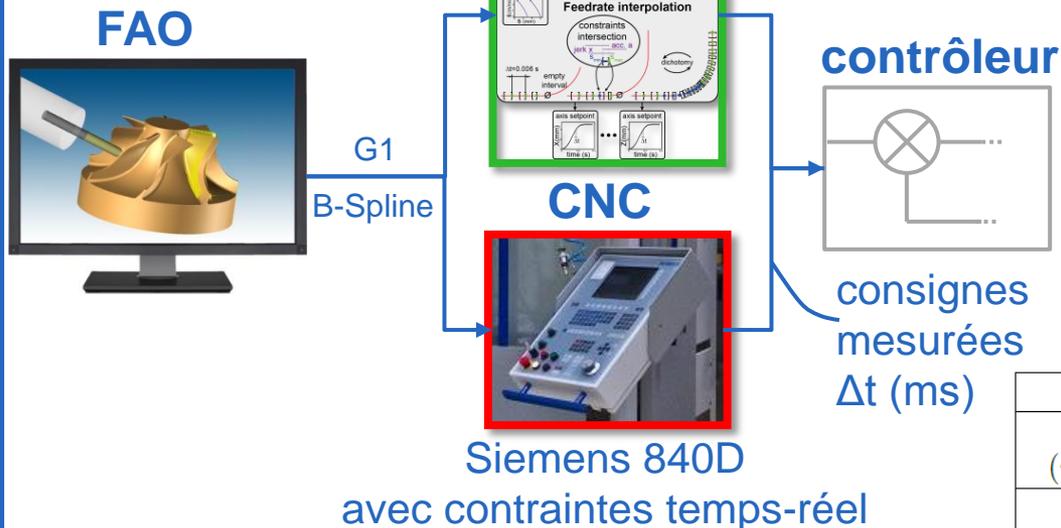
$$\hookrightarrow s_{j+1} = s_{\min} \text{ OU } s_{\max}$$



# Validation expérimentale

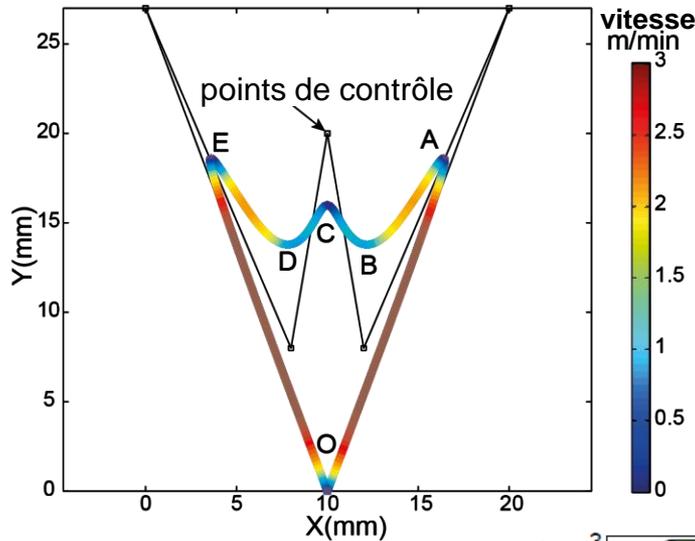
## ■ Critères de performance

- respect des contraintes
- productivité

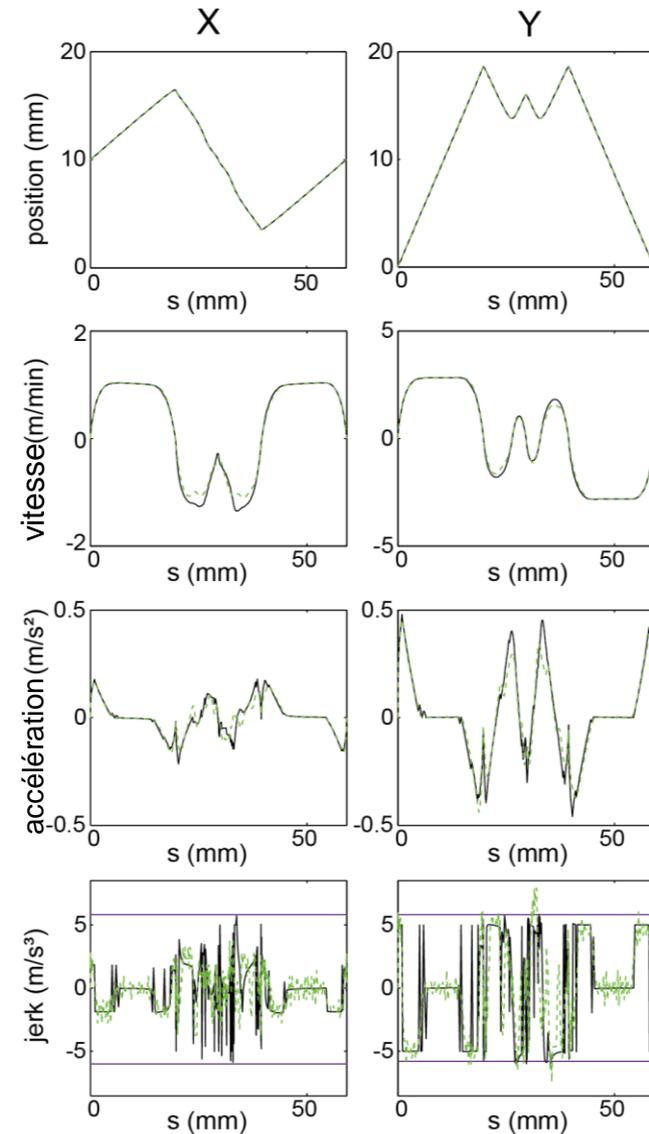
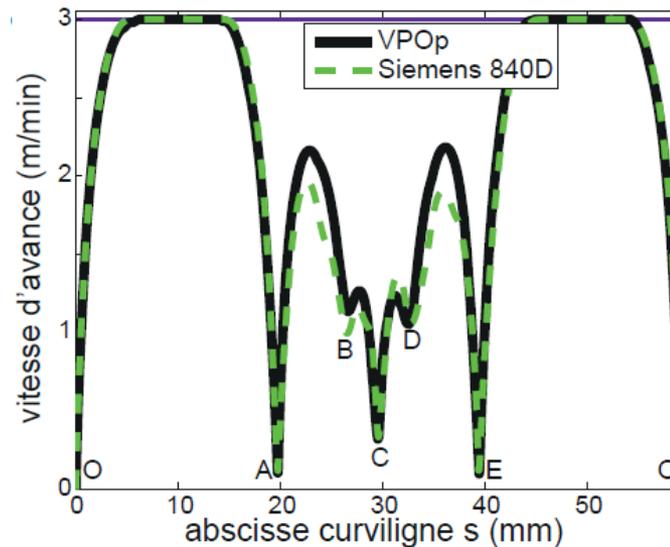


	X	Y	Z	A	C	tangentiel
$V_{max}$ ( $m/min - tr/min$ )	30	30	30	15	20	$F_{pr}$
$A_{max}$ ( $m/s^2 - tr/s^2$ )	2,5	3	2,1	0,83	0,83	10
$J_{max}$ ( $m/s^3 - tr/s^3$ )	5	5	50	5	100	100

# Trident 2 axes (B-Spline)

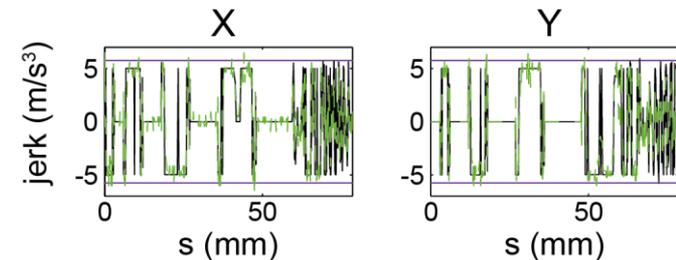
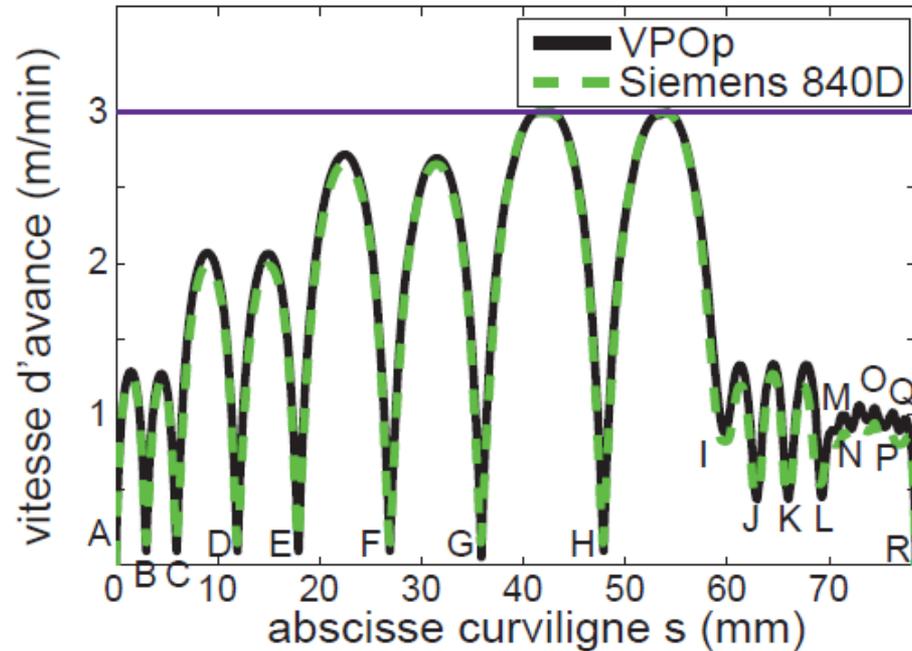
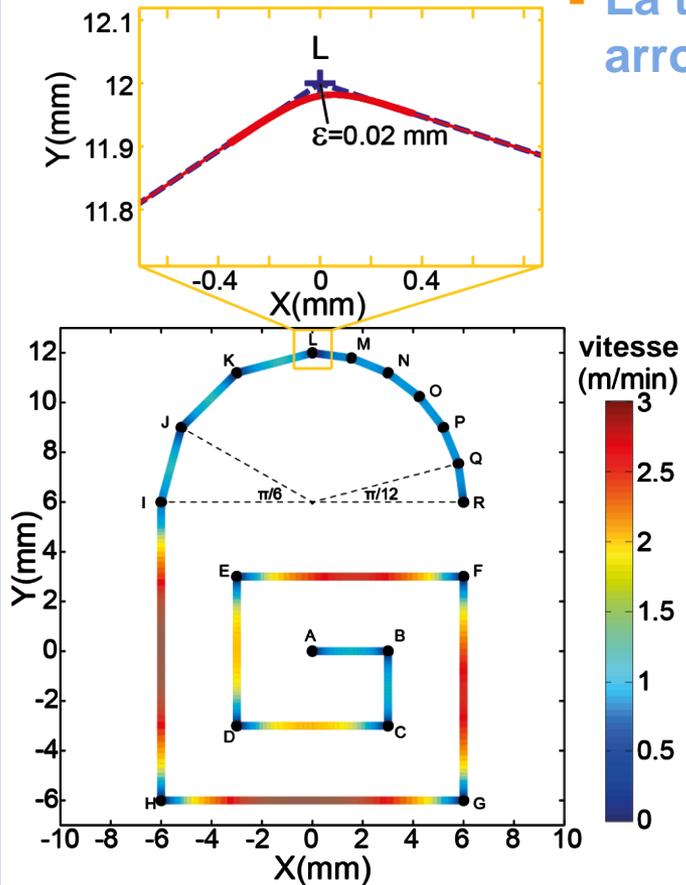


Siemens 840D program:  
 G1 X10 Y0 Z0  
**BSPLINE SD=3 F3000**  
 X20 Y27 Z0 PL=0  
 X12 Y8 Z0 PL=25  
 X10 Y20 Z0 PL=25  
 X8 Y8 Z0 PL=25  
 X0 Y27 Z0 PL=25  
 X10 Y0 Z0 PL=0



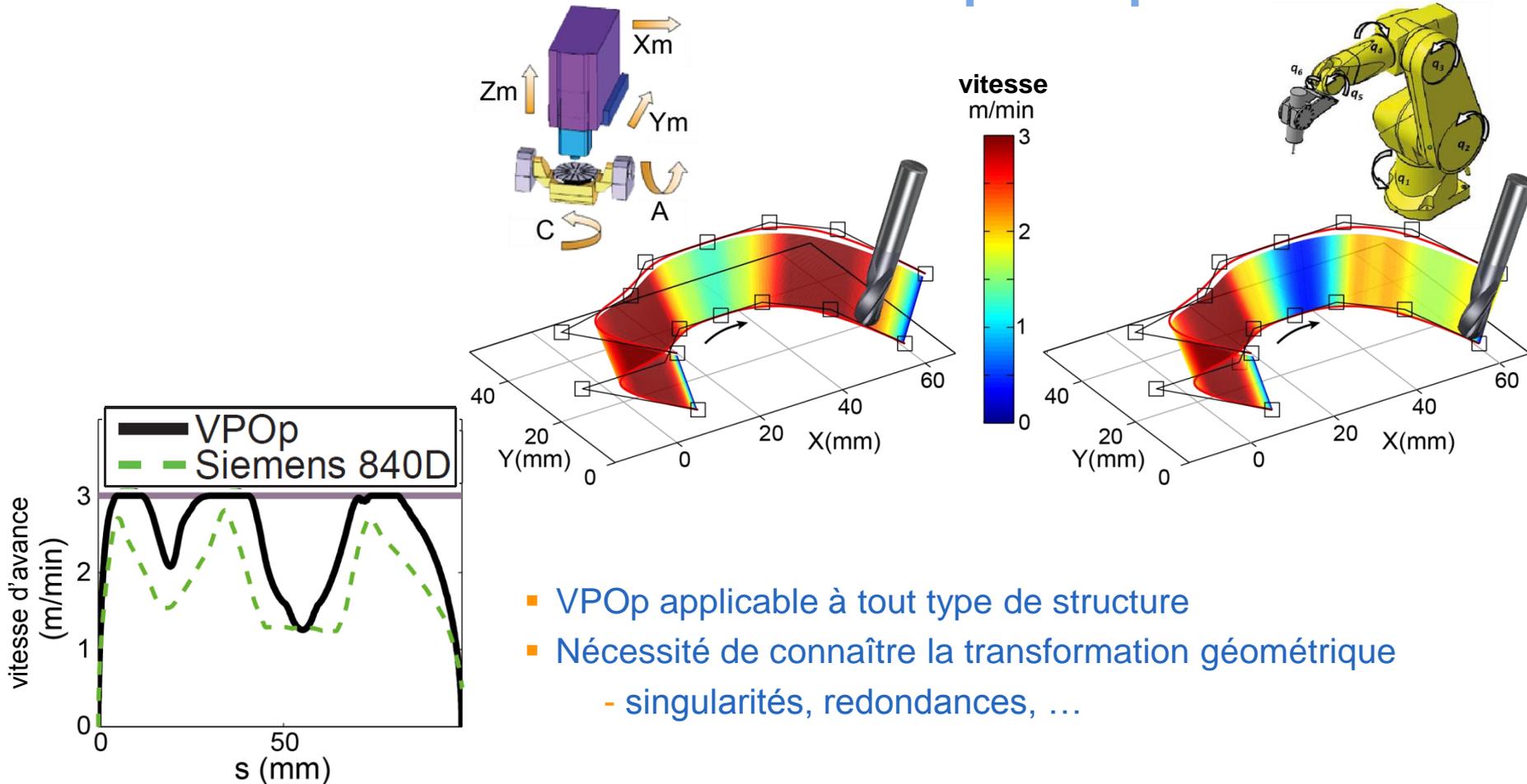
# Cadenas 2 axes (G1)

- La tolérance de contour de la CN est utilisée pour arrondir les discontinuités



# Poche ouverte 5 axes (B-Spline)

## Machine-outil 5 axes / robot anthropomorphe



- VPOp applicable à tout type de structure
- Nécessité de connaître la transformation géométrique
  - singularités, redondances, ...

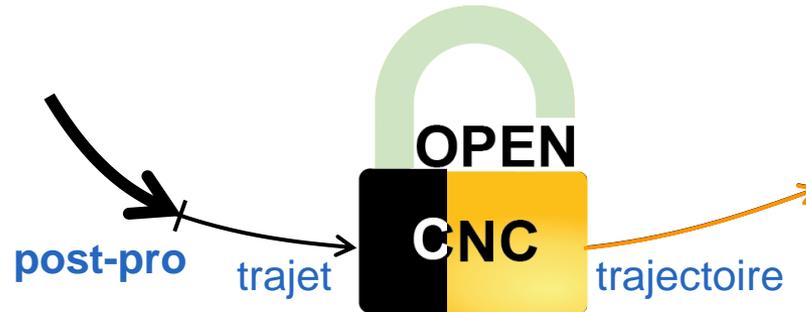
# Apports

X. Beudaert, S. Lavernhe, C. Tournier, (2012)

Feedrate interpolation with axis jerk constraints on 5-axis NURBS and G1 tool path, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 57(0):73 – 82

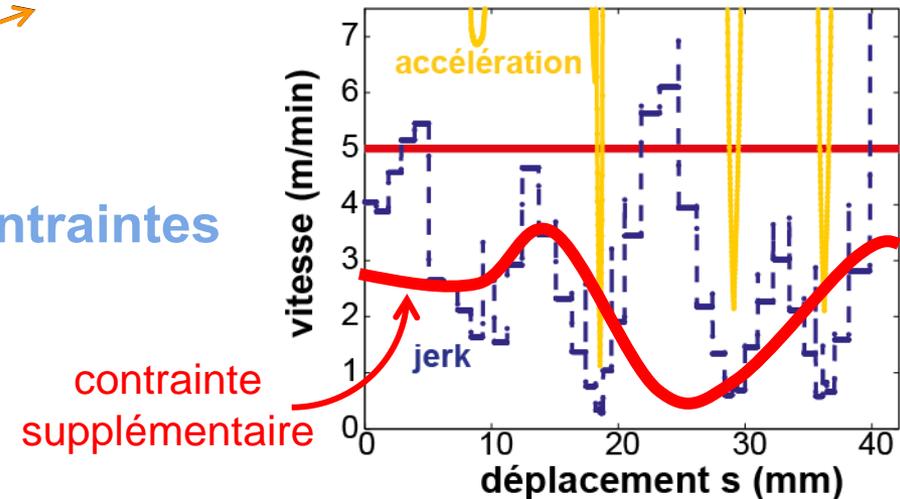
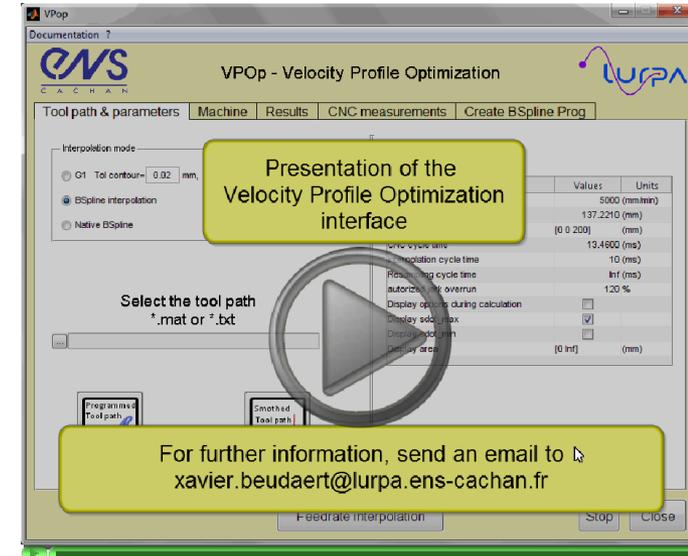
## ■ L'algorithme VPOp est adapté pour

- les trajectoires 3 et 5 axes
- différentes structures de machine
- les formats G1 et B-Spline
- les contraintes de **jerk des axes**



## ■ Possibilité d'intégrer d'autres contraintes

- écarts de contour
- procédé physique



# Plan

## 1- Introduction

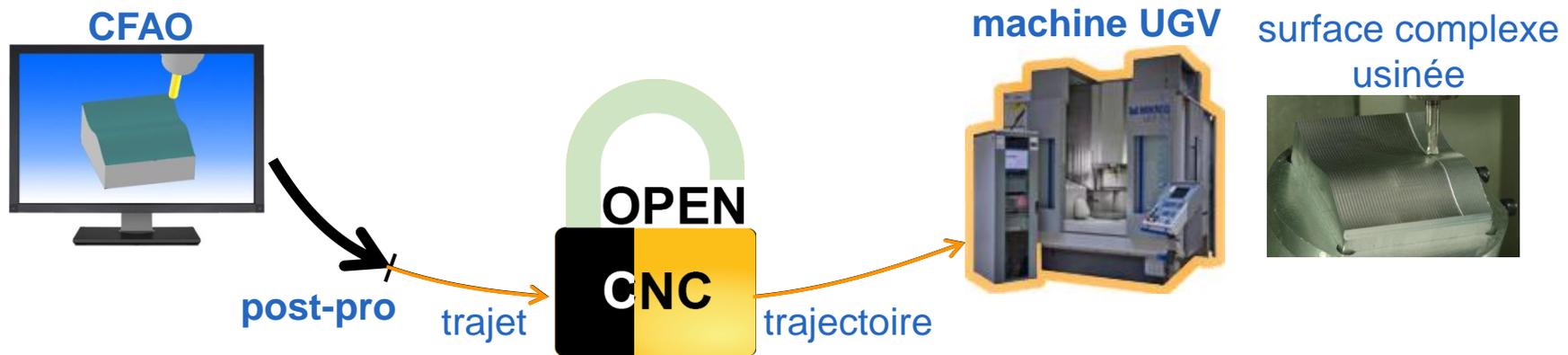
## 2- Commande numérique PREMIUM-OpenCNC

## 3- Interpolation de la trajectoire à jerk limité

## 4- Lissage des trajets 5 axes

## 5- Interpolation de la trajectoire directement sur la surface

## 6- Conclusions et perspectives



# Lissage des trajets

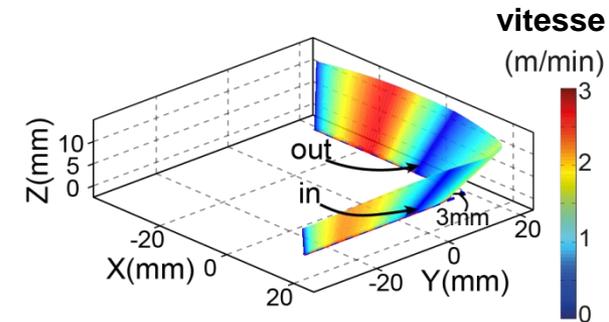
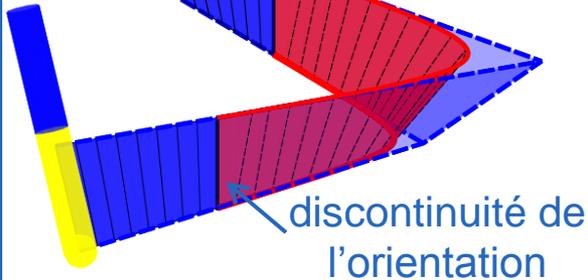
discontinuité  $\Rightarrow \mathbf{q}_{ss} = \infty \Rightarrow \dot{s} = 0$

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{q}} = \mathbf{q}_s \dot{s} \\ \ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{q}_{ss} \dot{s}^2 + \mathbf{q}_s \ddot{s} \\ \dddot{\mathbf{q}} = \mathbf{q}_{sss} \dot{s}^3 + 3 \mathbf{q}_{ss} \dot{s} \ddot{s} + \mathbf{q}_s \dddot{s} \end{cases}$$

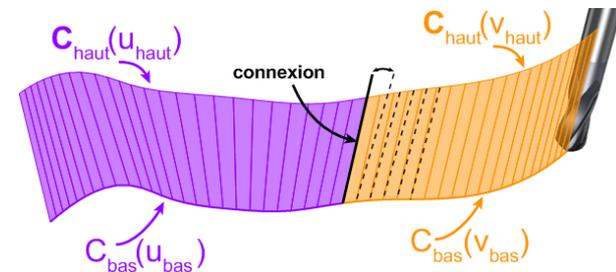
tol CN interpolation à jerk limité sans passage à vitesse nulle  $\Rightarrow \mathbf{q}_{sss}$  bornées  
continuité géométrique  $\mathcal{C}^2$  pour les trajets 3 axes

**Problème : Comment éviter les passages à vitesse nulle sur des trajets 5 axes?**

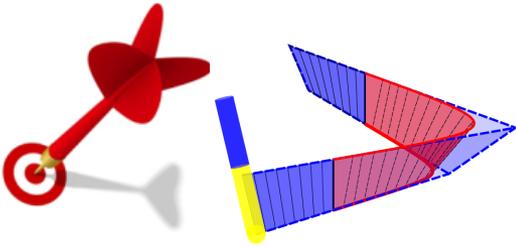
continuité géométrique  
des surfaces

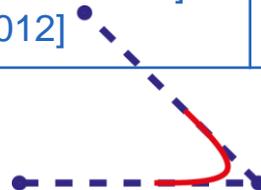


**Objectif : gestion de la continuité de l'évolution de l'orientation outil**



# Lissage des trajets - étude bibliographique

	3 axes	5 axes	
		espace machine	espace pièce
<b>lissage global</b>	[Bouard et al. 2011] approximation spline	[Castagnetti et al. 2008] [Lavernhe et al. 2008] compresseur Siemens	[Fleisig et al 2001] [Ho et al. 2003] [Langeron et al. 2004] [Pechard et al. 2009]
<b>arrondissement local</b>	[Yutkowitz and Chester 2005] (brevet Siemens) [Erkorkmaz et al. 2006] [Pateloup et al. 2010] [Pessoles et al. 2010] [Bi et al. 2012]	[Beudaert et al. 2011]	



## ■ Objectifs :

- raccorder des trajets **5 axes**
- éviter les ralentissements lors de l'interpolation à  **jerk limité**
- travailler dans l'**espace pièce** pour être indépendant de la machine

# Critères pour la fluidité des trajets

## ■ Espace machine

- dérivées géométriques bornées
- limite supérieure de la vitesse d'avance

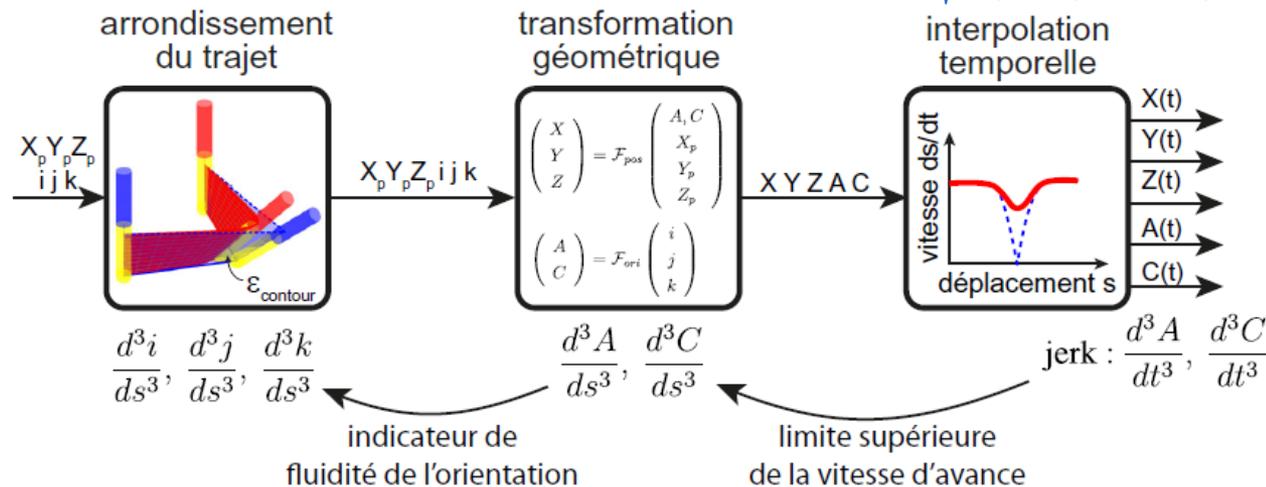
[Beudaert et al. 2011]

$$\dot{s} \leq \min \left( F_d; \frac{V_{\text{axes max}}}{|Q_s|}; \sqrt{\frac{A_{\text{axes max}}}{|Q_{ss}|}}; \sqrt[3]{\frac{J_{\text{axes max}}}{|Q_{sss}|}} \right)$$

## ■ Espace pièce

- continuité  $C^2$  pour la position
- critère de fluidité de l'orientation

$$F = \sqrt{\left(\frac{d^3i}{ds^3}\right)^2 + \left(\frac{d^3j}{ds^3}\right)^2 + \left(\frac{d^3k}{ds^3}\right)^2}$$

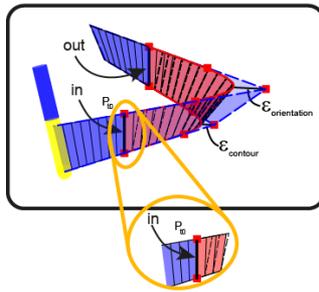


- hors singularités, la transformation géométrique conserve les continuités

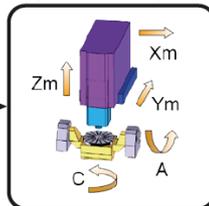
# Problème de paramétrage

(Siemens 840D)

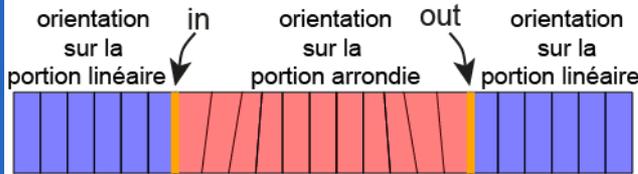
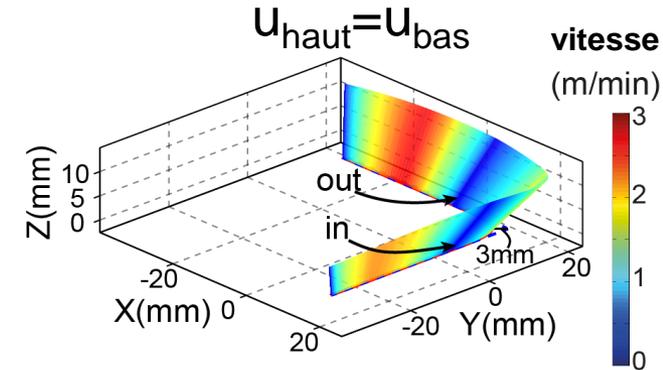
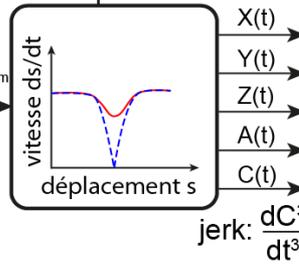
arrondissement



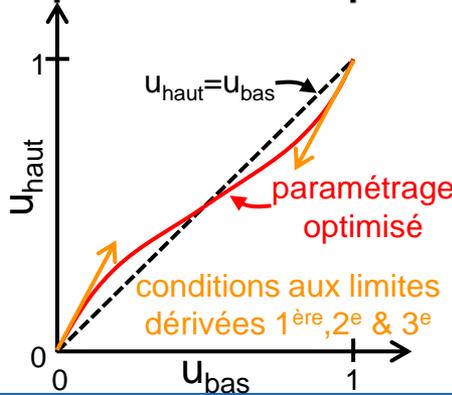
transformation  
géométrique



interpolation  
temporelle



$\frac{dOri}{ds} \epsilon^-$	$\frac{dOri}{ds} \epsilon^+$	$\frac{dOri}{ds} \epsilon^-$	$\frac{dOri}{ds} \epsilon^+$
$\frac{d^2Ori}{ds^2} \epsilon^-$	$\frac{d^2Ori}{ds^2} \epsilon^+$	$\frac{d^2Ori}{ds^2} \epsilon^-$	$\frac{d^2Ori}{ds^2} \epsilon^+$
$\frac{d^3Ori}{ds^3} \epsilon^-$	$\frac{d^3Ori}{ds^3} \epsilon^+$	$\frac{d^3Ori}{ds^3} \epsilon^-$	$\frac{d^3Ori}{ds^3} \epsilon^+$



▪  $U_{haut} = U_{bas} \Rightarrow$  vitesse très basse à l'entrée et à la sortie de l'arrondissement

- le paramétrage ne peut pas être linéaire!
- quel paramétrage utiliser? quel critère?

La fonction  $U_{haut} = g(U_{bas})$  doit être optimisée, mauvaises conditions limites  $\Rightarrow$  vitesse très basse

**Critère:** fluidité de l'orientation dans l'espace pièce

**Objectif:** minimiser  $F = \sqrt{\left(\frac{d^3i}{ds^3}\right)^2 + \left(\frac{d^3j}{ds^3}\right)^2 + \left(\frac{d^3k}{ds^3}\right)^2}$   
à la connexion entre l'arrondissement et les segments

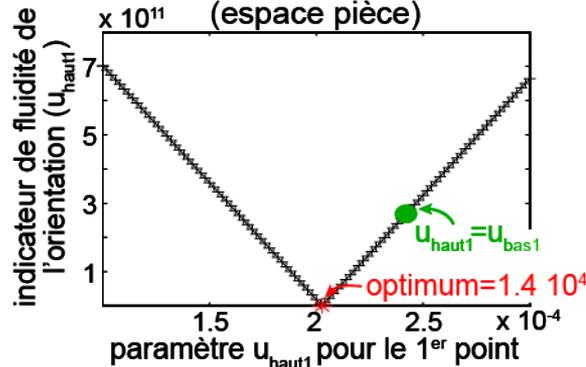
# Optimisation des dérivées 3<sup>ème</sup> (contraintes de jerk)

## Effet de la position du 1<sup>er</sup> point discrétisé sur

- l'indicateur de fluidité de l'orientation
- la limite supérieure du profil de vitesse

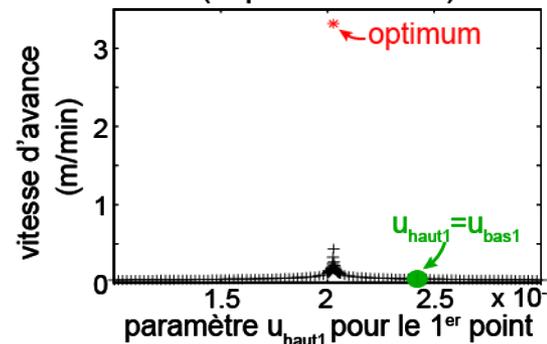
$$F = \sqrt{\left(\frac{d^3i}{ds^3}\right)^2 + \left(\frac{d^3j}{ds^3}\right)^2 + \left(\frac{d^3k}{ds^3}\right)^2}$$

évolution de  
l'indicateur de fluidité  
(espace pièce)



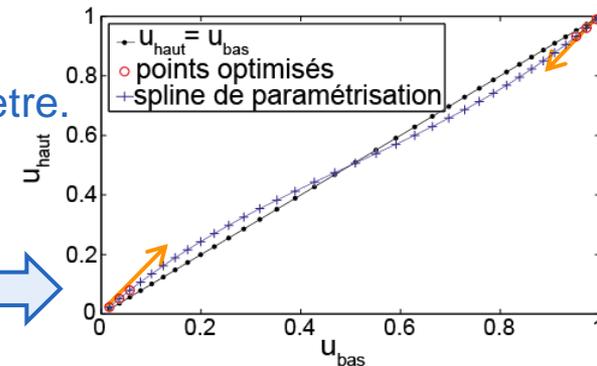
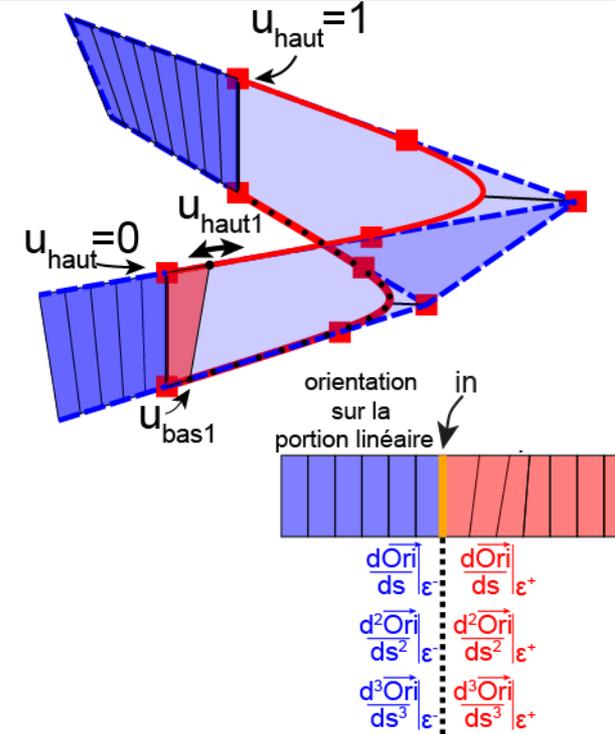
$$\dot{s} \leq \min \left( F_d; \frac{V_{\text{axes max}}}{|q_s|}; \sqrt{\frac{A_{\text{axes max}}}{q_{ss}}}; \sqrt[3]{\frac{J_{\text{axes max}}}{q_{sss}}} \right)$$

évolution de la  
limite supérieure de vitesse  
(espace machine)



## Les dérivées 3<sup>ème</sup> sont très sensibles à la variation du paramètre.

## Après optimisation, la courbe de paramétrage $u_{\text{haut}} = g(u_{\text{bas}})$ respecte les conditions aux limites



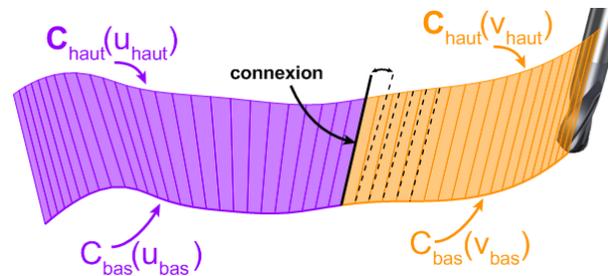
# Apports

X. Beudaert, S. Lavernhe, C. Tournier, (2013)

5-axis local corner rounding of linear tool path discontinuities,  
International Journal of Machine Tools & Manufacture

## ■ Lissage des trajets 5 axes

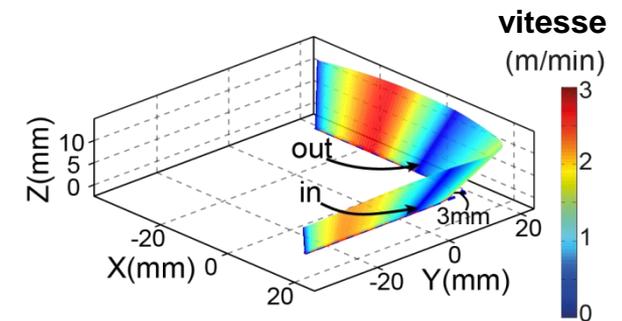
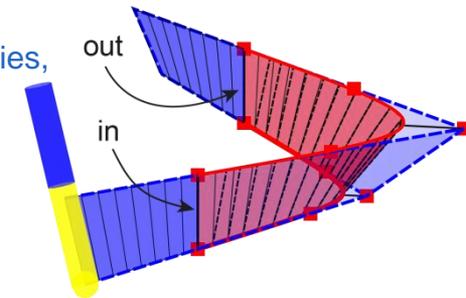
- modèle d'arrondissement local en 3 et 5 axes
- avec contrôle de la géométrie
- dans espace pièce



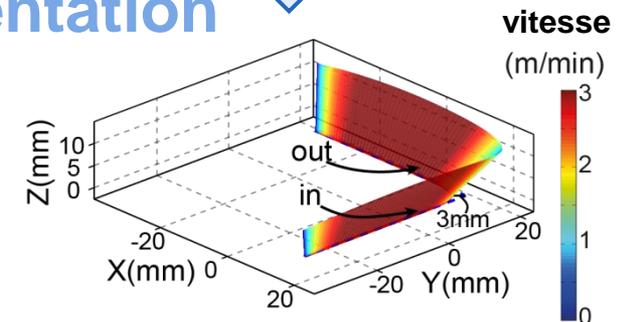
## ■ Optimisation de la connexion en orientation

- critère de fluidité de l'orientation

$$F = \sqrt{\left(\frac{d^3i}{ds^3}\right)^2 + \left(\frac{d^3j}{ds^3}\right)^2 + \left(\frac{d^3k}{ds^3}\right)^2}$$



$$u_{\text{haut}} = g(u_{\text{bas}})$$



# Plan

## 1- Introduction

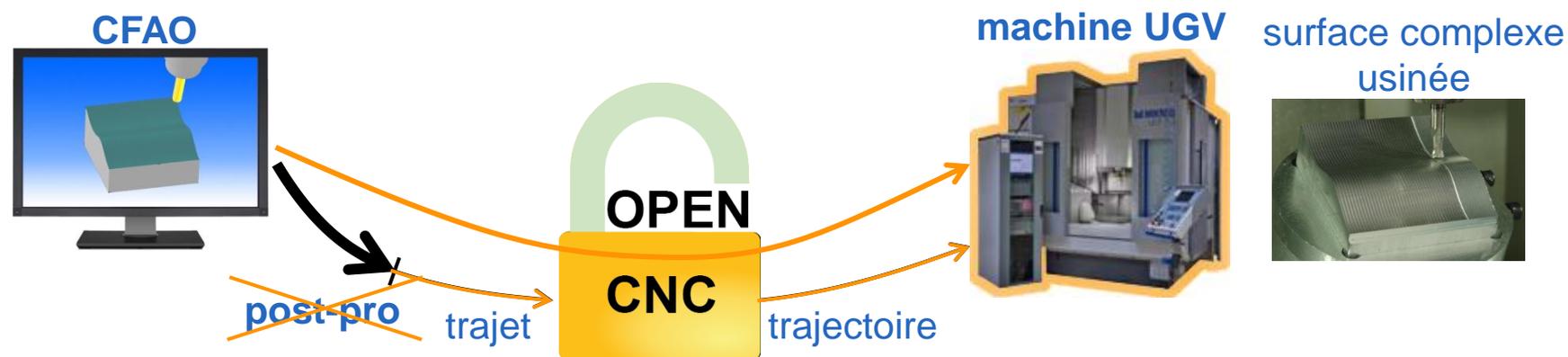
## 2- Commande numérique PREMIUM-OpenCNC

## 3- Interpolation de la trajectoire à jerk limité

## 4- Lissage des trajets 5 axes

## 5- Interpolation de la trajectoire directement sur la surface

## 6- Conclusions et perspectives

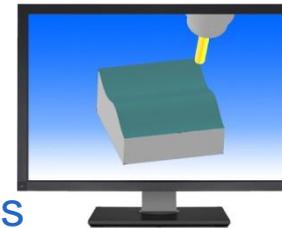


# Problèmes liés au post-processeur

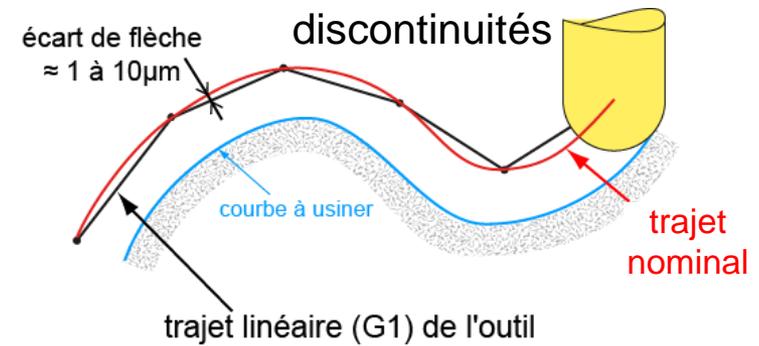
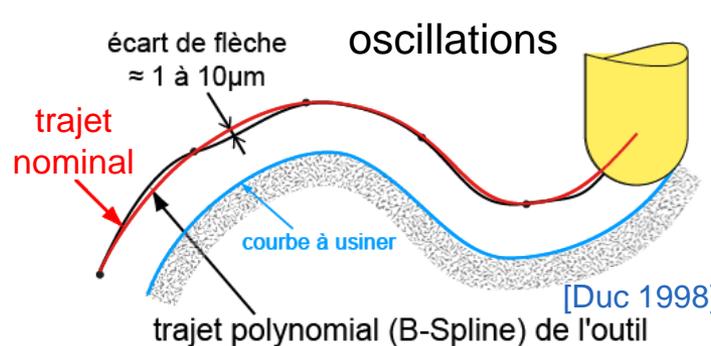
## ■ Perte d'information

- dégradation de la **géométrie**
  - introduction de défauts géométriques
- dégradation de la **fluidité**
  - discontinuités (format G1) [Lartigue 2004]  
[Duc 1998]
  - oscillations (format B-Spline) [Bohez 2002]

FAO

données  
haut niveaupost-pro  
trajet

⇒ diminution de la qualité et de la productivité



**DTIS: Direct Trajectory Interpolation on the Surface**

# Interpolation de la trajectoire sur la surface - DTIS

## ■ Bibliographie

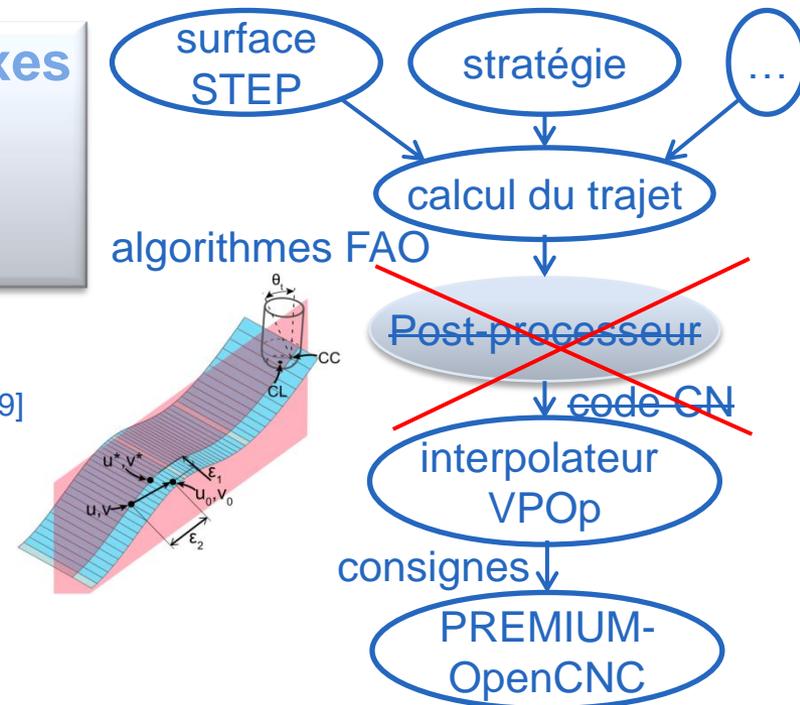
- concept de surface d'usinage [Duc 1999]
- trajectoire de l'outil sur la surface [Koren Lin 1995] [Tsai et al. 2003] [Liang Li 2013]
  - vitesse constante  $\Rightarrow$  pas de prise en compte des contraintes cinématiques

## ■ Objectif : calculer les consignes des axes

- en respectant les **contraintes cinématiques**
- à partir de la **géométrie nominale**
- sur des trajets 3 ou 5 axes

## ■ Définition du trajet nominal Step-NC [ISO 14649]

- la surface à usiner
- la stratégie d'usinage
- la géométrie outil



# PREMIUM-OpenCNC

- Validation sur un moyen industriel performant
- Maîtrise de l'ensemble de la chaîne numérique grâce à la commande numérique ouverte



PREMIUM-OpenCNC



Siemens 840D

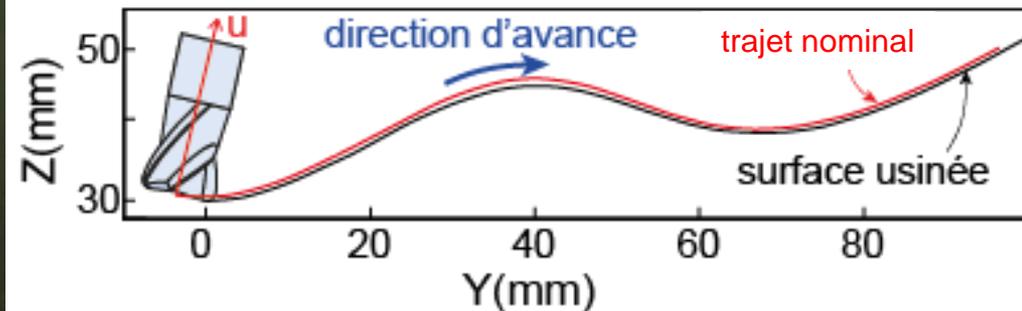
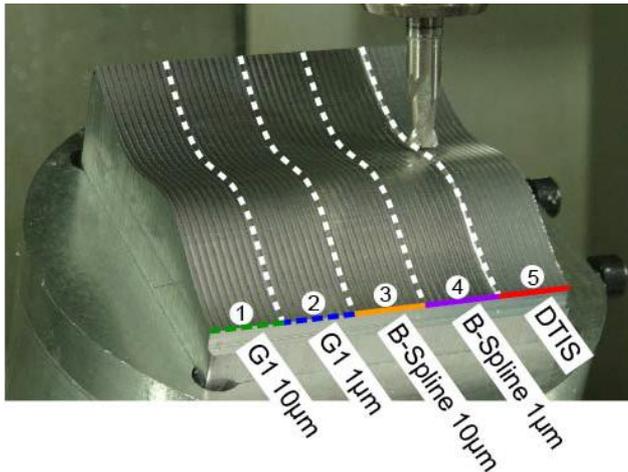
## PREMIUM-OpenCNC

- utilisation limitée aux travaux de recherche
- très bon moyen expérimental même au niveau international
  - Vancouver, Nantes, Aachen, Taiwan,...

## Application - DTIS

### ■ Surface complexe usinée en 5 axes

- comparaison avec les stratégies standards G1 et B-Spline



N°	format, tolérance FAO	FAO → code CN	CNC	temps usinage (s)
1	G1 10µm	Catia → G1	Siemens 840D	14.4
2	G1 1 µm	Catia → G1	Siemens 840D	12.2
3	B-Spline 10 µm	Catia → B-Spline	Siemens 840D	8
4	B-Spline 1 µm	Catia → B-Spline	Siemens 840D	9
5	DTIS	DTIS + VPOp + PREMIUM-OpenCNC		3

qualité  
macro-géométrique

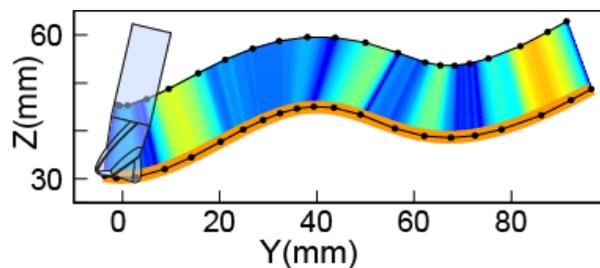
productivité

## Vidéo d'usinage

**B-Spline 10  $\mu\text{m}$   
Siemens 840D**



temps d'usinage d'une passe  
8 s

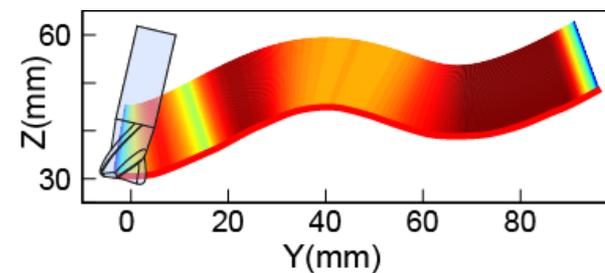


**Méthode DTIS + VPOp  
PREMIUM-OpenCNC**



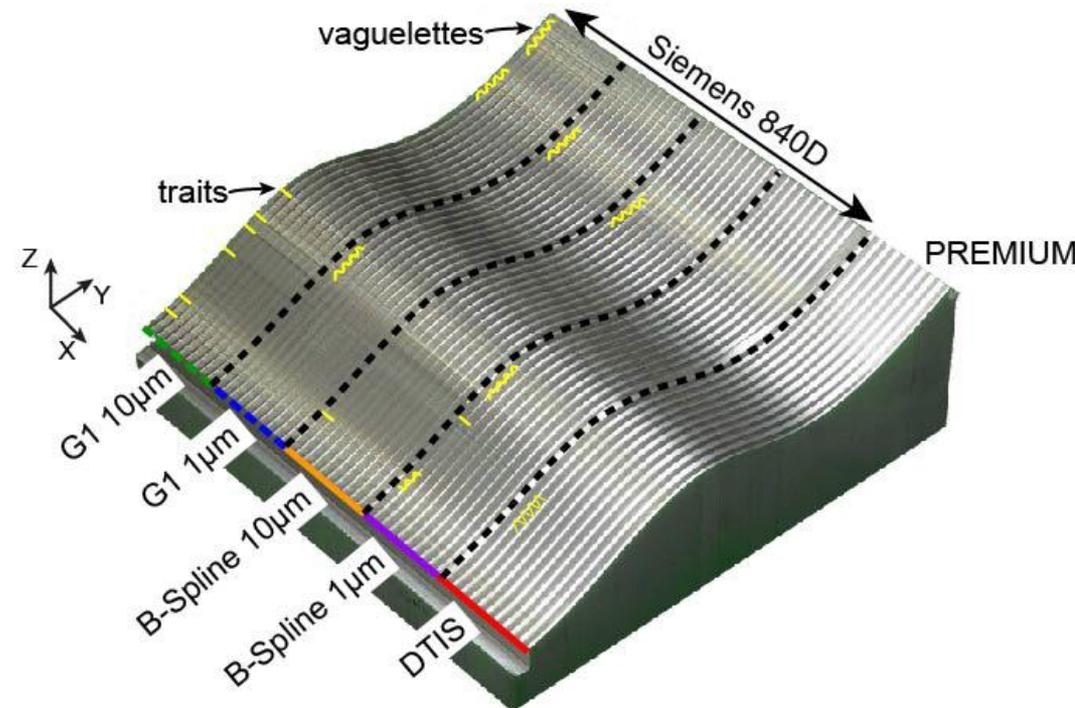
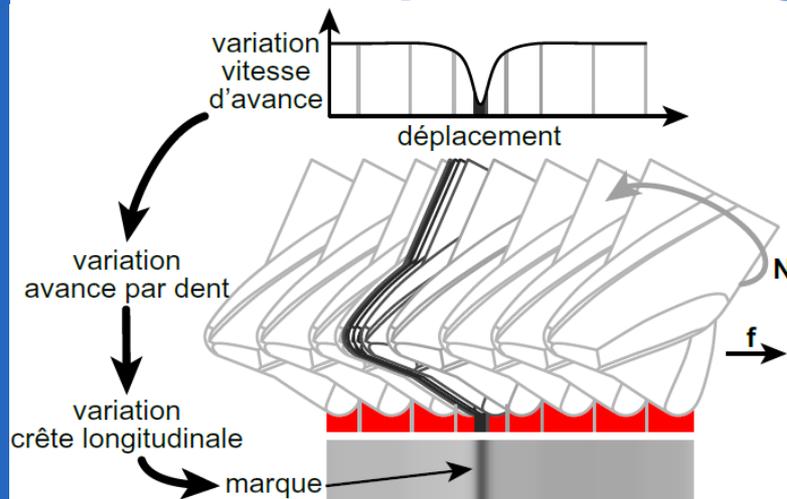
temps d'usinage d'une passe  
3 s

vitesse  
d'avance  
(m/min)



## Analyse de la surface usinée

- Les fortes variations de la vitesse d'avance produisent des marques d'usinage

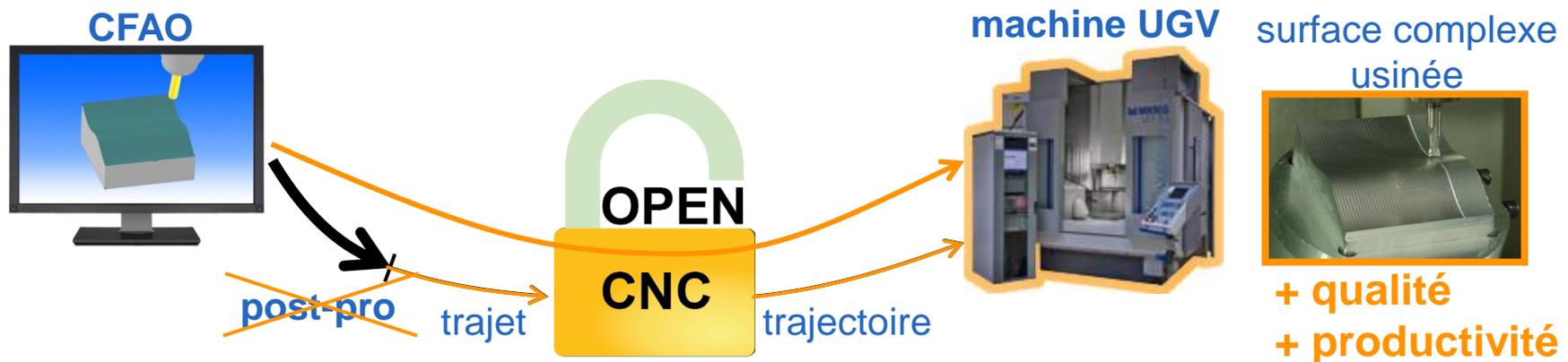


amélioration de l'aspect de la surface

# Apports

## ■ Interpolation de la trajectoire directement sur la surface

- **pas d'écart macro-géométrique** induit par le passage au code CN
- calcul de la trajectoire respectant les **contraintes cinématiques**
- **le trajet est plus lisse**
- la vitesse d'avance est plus élevée et moins saccadée
  - **gain de productivité**
  - **gain sur l'aspect de la surface usinée**



# Plan

## 1- Introduction

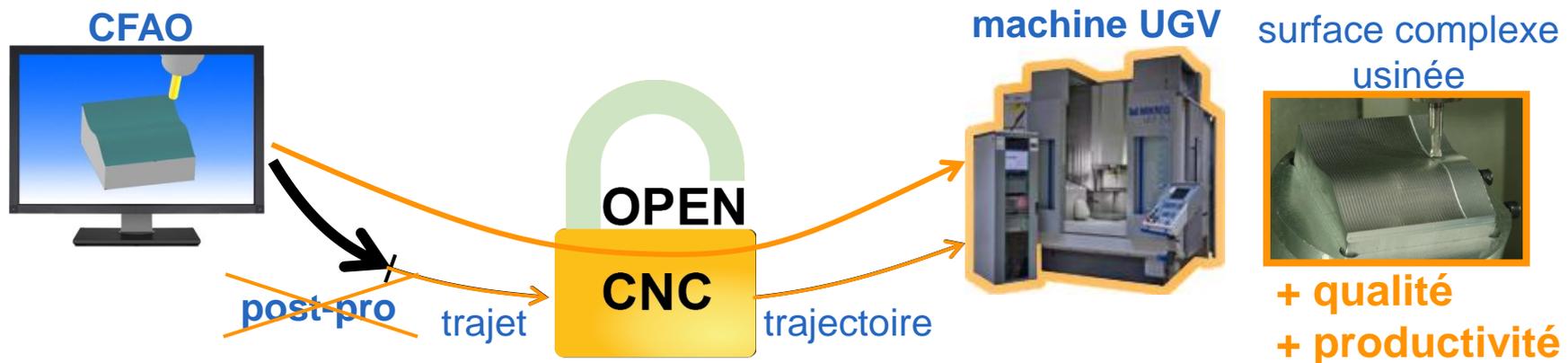
## 2- Commande numérique PREMIUM-OpenCNC

## 3- Interpolation de la trajectoire à jerk limité

## 4- Lissage des trajets 5 axes

## 5- Interpolation de la trajectoire directement sur la surface

## 6- Conclusions et perspectives



# Conclusions

## ■ Contexte

- usinage des surfaces complexes : gestion du déplacement outil/pièce
- les commandes numériques industrielles sont des boîtes noires
- le format de description des trajets induit
  - écarts géométriques
  - perte de fluidité (oscillations)



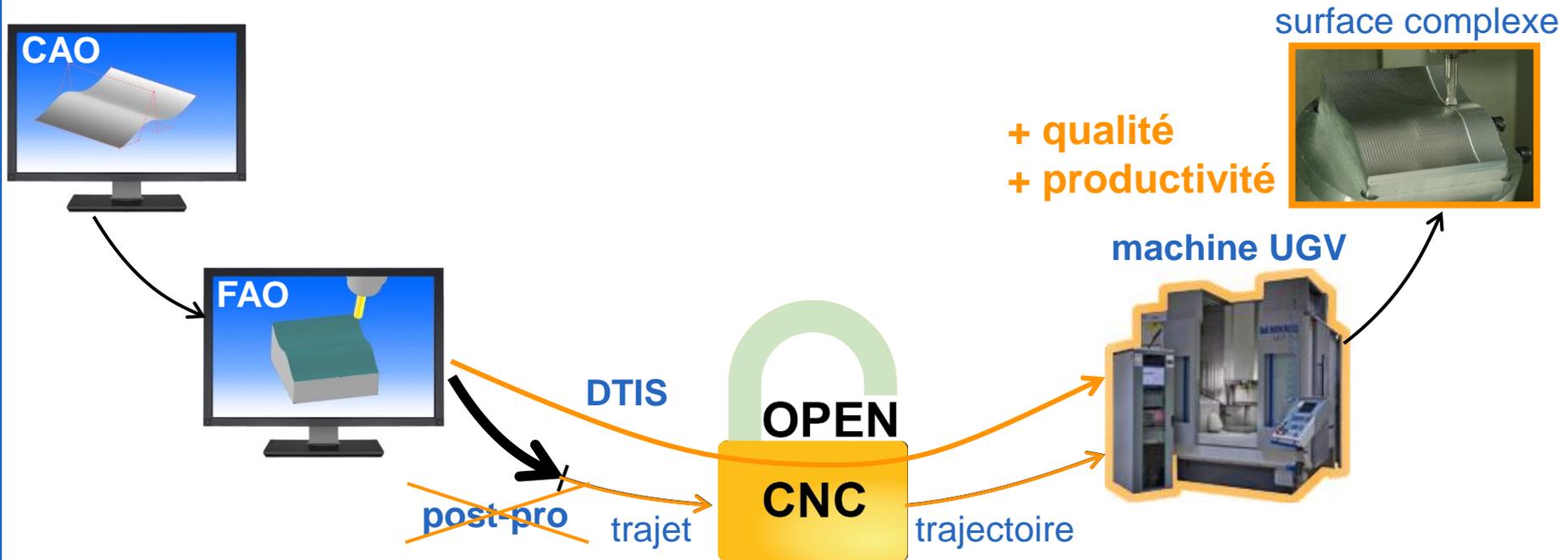
**Objectif** : améliorer la qualité et la productivité du processus de fabrication des surfaces

**Moyen** : lever les verrous associés aux commandes numériques industrielles

⇒ **optimiser l'interpolation des trajectoires**

## Revendications

- Création de la commande numérique PREMIUM-OpenCNC
  - mise en œuvre sur une machine industrielle 5 axes UGV
  - interpolation temporelle des trajectoires à jerk limité (VPOp)
  - arrondissement et connexion des trajets 5 axes



- Interpolation de la trajectoire directement sur la surface - DTIS

# Perspectives

## ■ Amélioration de l'architecture du système

- améliorer du code pour réduire les temps de calcul (fenêtre glissante)
- intégrer les travaux dans le cadre Step-NC [Li Liang 2013], [Fofdation 2013]

## ■ Optimisation des trajets

- lissage des trajets 5 axes

## ■ Contraintes prises en compte lors de l'interpolation temporelle

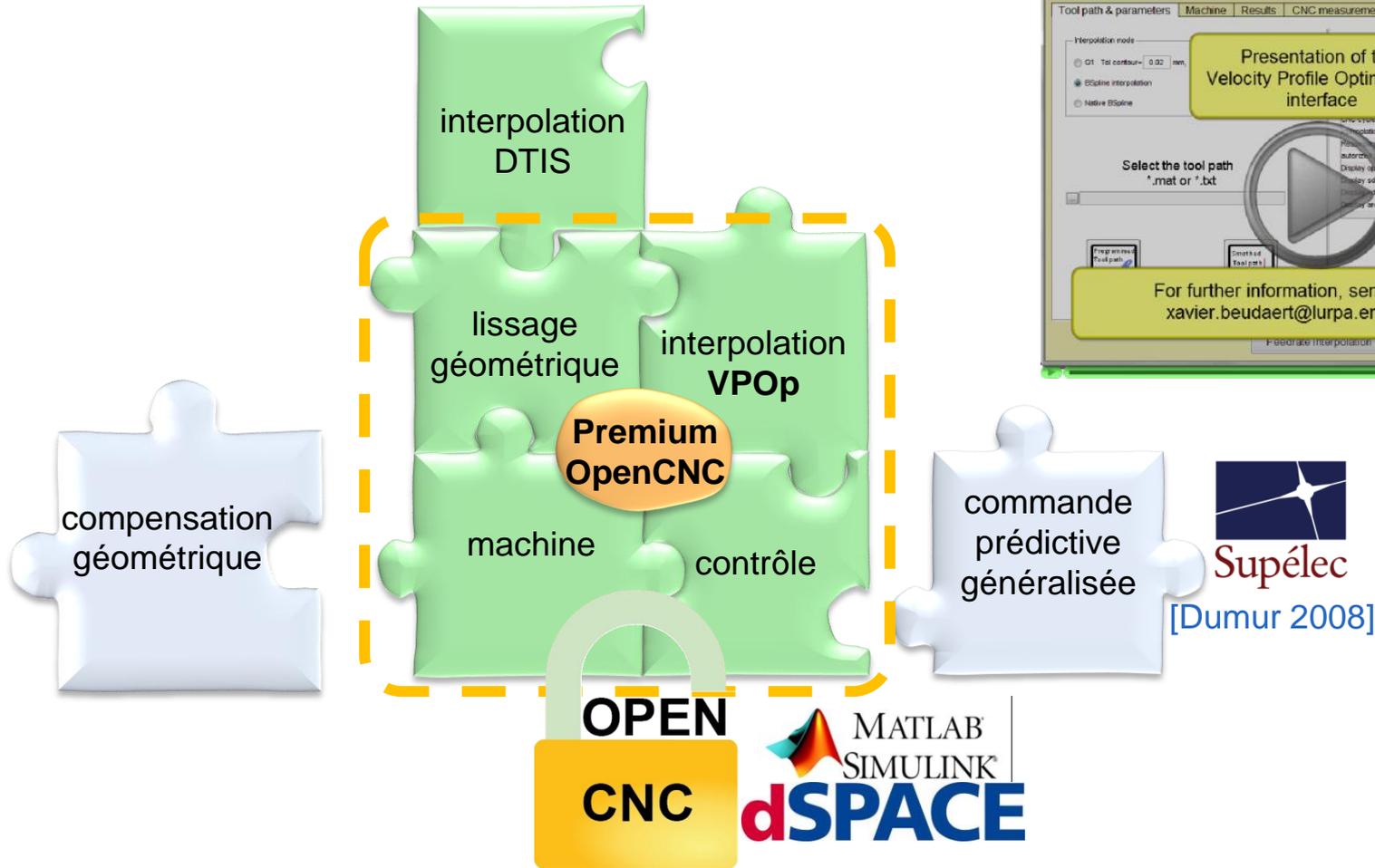
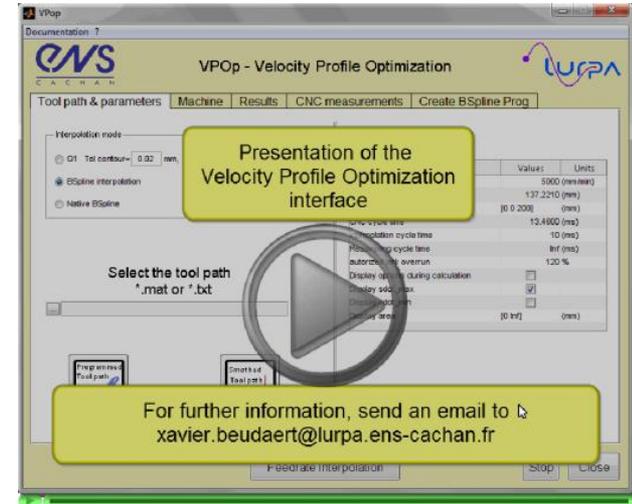
- écarts d'asservissement
- efforts de coupe
- niveau de jerk

## ■ Développement de techniques d'apprentissage itératif

- « iterative learning control » pour réduire les écarts d'asservissement
- adaptation de la vitesse d'avance en fonction des efforts d'usinage

# Projet PREMIUM

<http://webserv.lurpa.ens-cachan.fr/geo3d/premium/vpop>



# Commande numérique ouverte : interpolation optimisée pour l'usinage 5 axes grande vitesse des surfaces complexes

Soutenance de thèse présentée par :

Xavier Beudaert

## Merci de votre attention

Directeur : Christophe Tournier  
Co-encadrant : Sylvain Lavernhe

nom@lurpa.ens-cachan.fr  
LURPA, ENS Cachan, Université Paris Sud

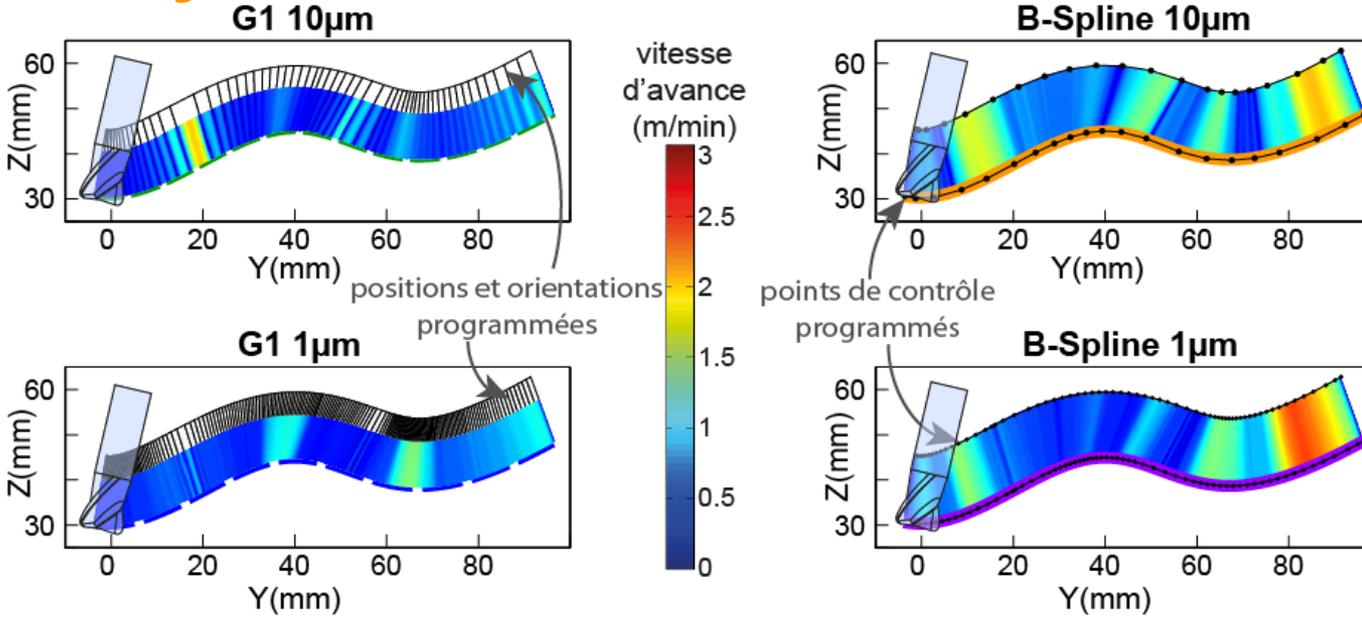
# Références

- ALTINTAS, Y., VERL, A., BRECHER, C., URIARTE, L. et PRITSCHOW, G. (2011). Machine tool feed drives. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 60(2):779 – 796.
- BÉARÉE (2005). Prise en compte des phénomènes vibratoires dans la génération de commande des machines-outils à dynamique élevée. Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers.
- BEUDAERT, X., PECHARD, P.-Y. et TOURNIER, C. (2011). 5-axis tool path smoothing based on drive constraints. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 51(12):958 – 965.
- BEUDAERT, X., LAVERNHE, S. et TOURNIER, C. (2012). Feedrate interpolation with axis jerk constraints on 5-axis NURBS and G1 tool path. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 57(0):73 – 82.
- BEUDAERT, X., LAVERNHE, S. et TOURNIER, C. (2013). 5-axis local corner rounding of linear tool path discontinuities. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 73(0):9 – 16.
- BI, Q. Z., JIN, Y. Q., WANG, Y. H., ZHU, L. M. et DING, H. (2012). An analytical curvature continuous bezier transition algorithm for high-speed machining of a linear tool path. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 57(0):55 – 65.
- BOBROW, J., DUBOWSKY, S. et GIBSON, J. (1985). Time-optimal control of robotic manipulators along specified paths. International Journal of Robotics Research, 4(3):3 – 17.
- BOHEZ, E. L. J. (2002). Compensating for systematic errors in 5-axis nc machining. Computer-Aided Design, 34(5):391 – 403.
- BOUARD, M., PATELOUP, V. et ARMAND, P. (2011). Pocketing toolpath computation using an optimization method. Computer-Aided Design, 43(9):1099 – 1109.
- CASTAGNETTI, C. (2008). Amélioration du comportement cinématique des machines par l'optimisation des trajets d'usinage 5 axes. Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal - Institut Français de Mécanique Avancée.
- DONG, J., FERREIRA, P. et STORI, J. (2007). Feed-rate optimization with jerk constraints for generating minimum-time trajectories. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 47(12-13):1941 – 1955.
- DUC, E. (1998). Usinage de formes gauche : contribution à l'amélioration de la qualité des trajectoires d'usinage. Thèse de doctorat, École Normale Supérieure de Cachan.
- DUC, E., LARTIGUE, C., TOURNIER, C. et BOURDET, P. (1999). A new concept for the design and the manufacturing of free-form surfaces : The machining surface. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 48(1):103 – 106.
- DUGAS, A. (2002). CFAO et UGV - Simulation d'usinage de formes complexes. Thèse de doctorat, École Centrale de Nantes - Université de Nantes.
- DUMUR, D., SUSANU, M. et AUBOURG, M. (2008). Complex form machining with axis drive predictive control. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 57(1):399 – 402.
- ERKORKMAZ, K. et ALTINTAS, Y. (2001). High speed CNC system design. Part I : jerk limited trajectory generation and quintic spline interpolation. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 41(9):1323 – 1345.
- ERKORKMAZ, K., YEUNG, C.-H. et ALTINTAS, Y. (2006). Virtual CNC system. Part II. high speed contouring application. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 46(10):1124 – 1138.

# Références

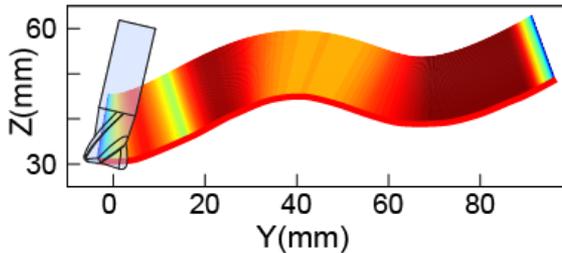
- FLEISIG, R. V. et SPENCE, A. D. (2001). A constant feed and reduced angular acceleration interpolation algorithm for multi-axis machining. *Computer-Aided Design*, 33(1):1 – 15.
- FOFDATION (2013). Fofdation project (2010-2013), [www.fofdation-project.eu](http://www.fofdation-project.eu), consulté le 1 février 2013.
- HO, M.-C., HWANG, Y.-R. et HU, C.-H. (2003). Five-axis tool orientation smoothing using quaternion interpolation algorithm. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43(12):1259 – 1267.
- ISO14649-11 (2004). Industrial automation systems and integration - physical device control - data model for computerized numerical controllers - part 11 : Process data for milling.
- KOREN, Y. et LIN, R.-S. (1995). Five-axis surface interpolators. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 44(1):379 – 382.
- LANGERON, J. M., DUC, E., LARTIGUE, C. et BOURDET, P. (2004). A new format for 5-axis tool path computation, using Bspline curves. *Computer-Aided Design*, 36(12):1219 – 1229.
- LARTIGUE, C., TOURNIER, C., RITOU, M. et DUMUR, D. (2004). High-performance NC for HSM by means of polynomial trajectories. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 53(1):317 – 320.
- LAVERNHE, S., TOURNIER, C. et LARTIGUE, C. (2008). Optimization of 5-axis high-speed machining using a surface based approach. *Computer-Aided Design*, 40(10-11):1015 – 1023.
- LIANG, H. et LI, X. (2013). Five-axis STEP-NC controller for machining of surfaces. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pages 1–10.
- PATELOUP, V. (2005). Amélioration du comportement cinématique des machines outils UGV - Application au calcul de trajets d'évidement de poches. Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal - Institut Français de Mécanique Avancée.
- PATELOUP, V., DUC, E. et RAY, P. (2010). Bspline approximation of circle arc and straight line for pocket machining. *Computer-Aided Design*, 42(9):817 – 827.
- PÉCHARD, 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 Normale Supérieure de Cachan.
- PESSOLES, X. (2010). Aide au choix du posage en usinage 5 axes continus par la modélisation du comportement cinématique des machines - outils. Thèse de doctorat, Université Toulouse 3 Paul Sabatier.
- PRÉVOST, D. (2011). Modélisation avancée du couple Machine Outil / Commande Numérique dans un contexte UGV pour l'optimisation du calcul de trajectoires multi axes. Thèse de doctorat, École Normale Supérieure de Cachan.
- SENCER, B., ALTINTAS, Y. et CROFT, E. (2008). Feed optimization for five-axis CNC machine tools with drive constraints. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48(7-8):733 – 745.
- TSAI, M. C., CHENG, C. W. et CHENG, M. Y. (2003). A real-time NURBS surface interpolator for precision three-axis CNC machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43(12):1217 – 1227.
- TSAI, M.-S., NIEN, H.-W. et YAU, H.-T. (2010). Development of a real-time look-ahead interpolation methodology with spline-fitting technique for high-speed machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 47(5-8):621–638.
- YUTKOWITZ, S. J. et CHESTER, W. (2005). Apparatus and method for smooth cornering in a motion control system, United States, Siemens Energy & Automation, Inc. Alpharetta, GA (US Patent 6922606).

# Analyse des vitesses d'avance mesurées

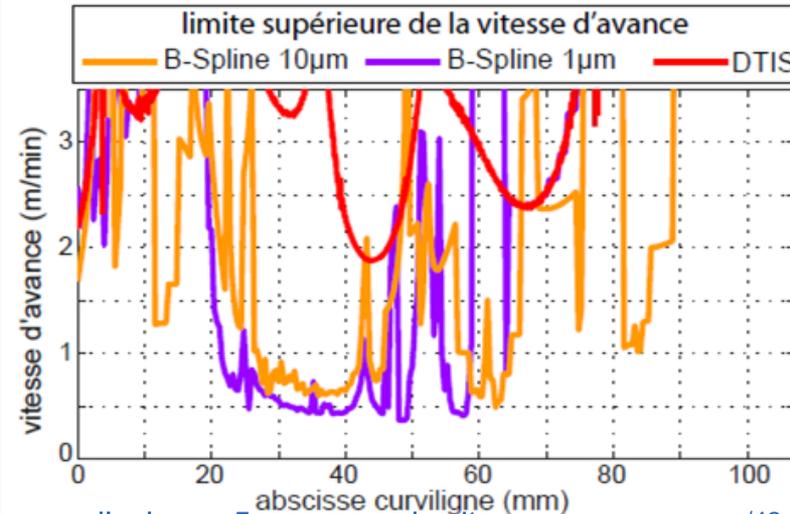


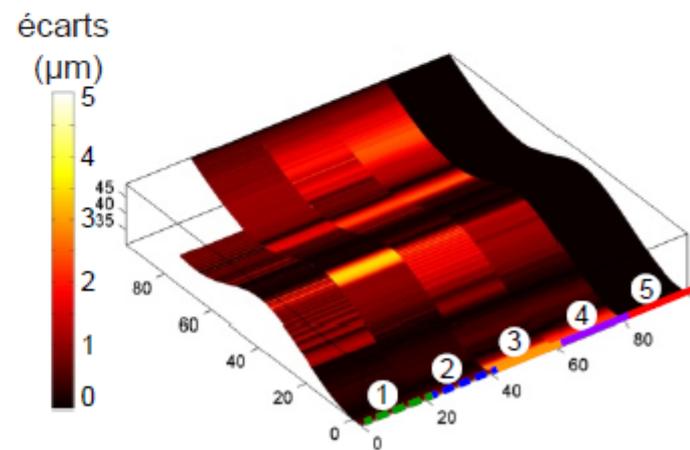
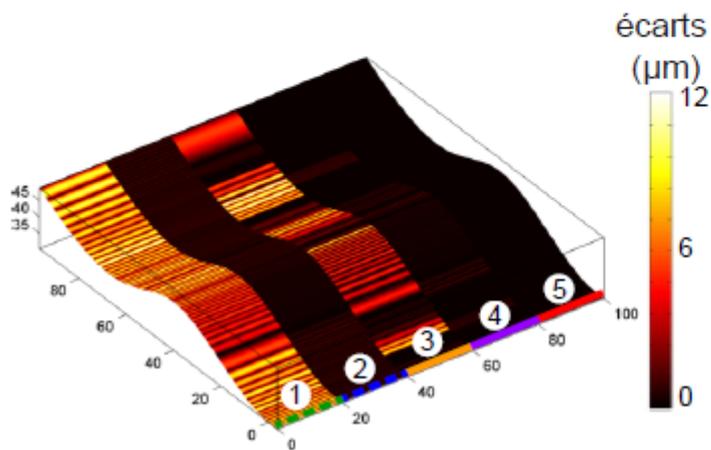
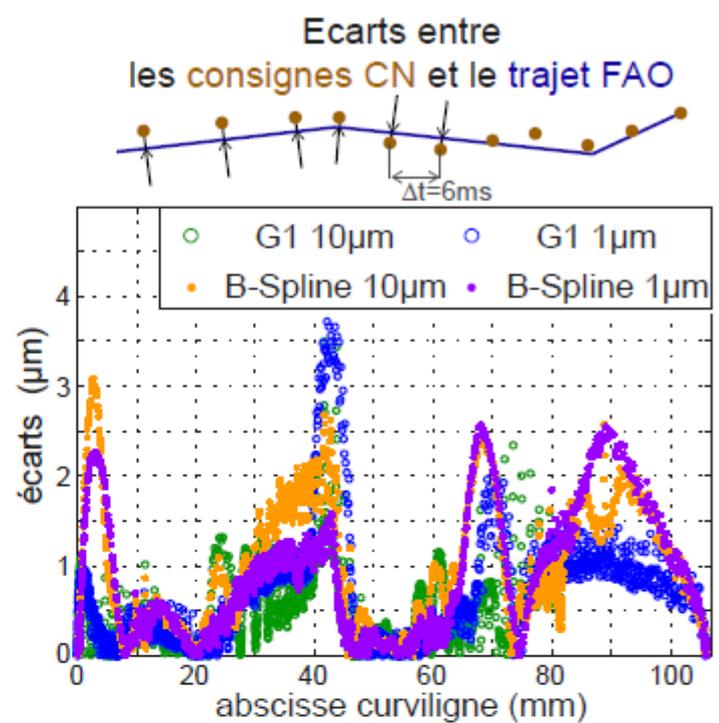
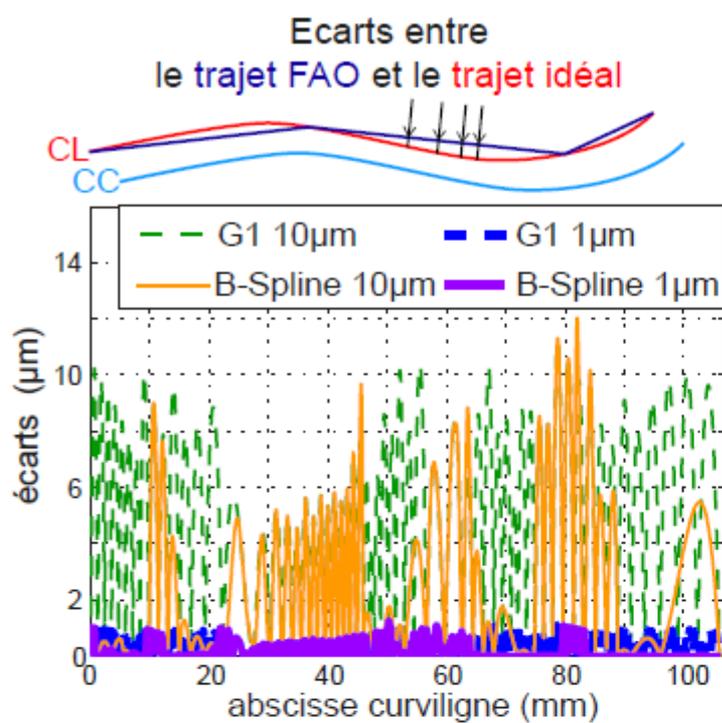
## DTIS

Interpolation de la Trajectoire Directement sur la Surface

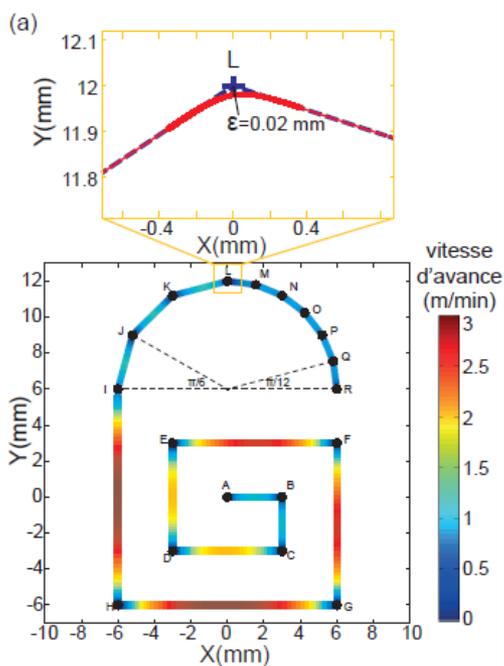


vitesse d'avance limitée par les contraintes cinématiques





**Figure 103 – Écart de contour introduits par la FAO et par la CN**



Machine Mori Seiki du MAL de Vancouver  
tolérance de contour 0.04mm  
jerk=8 m/s<sup>3</sup> pour X et Y

Machine DMG de l'ENS Cachan  
tolérance de contour 0.02mm  
jerk=100 m/s<sup>3</sup> pour X et Y

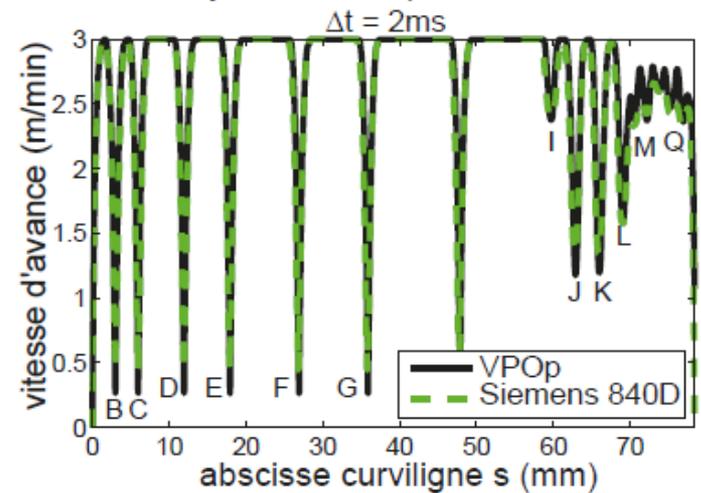
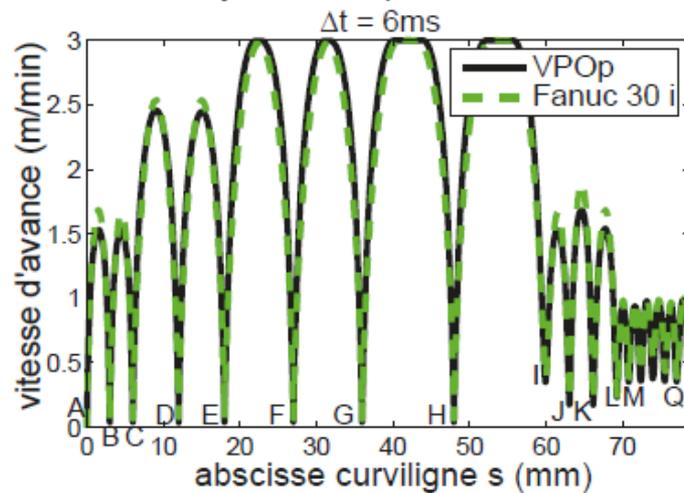


Figure 68 – Profil de vitesse sur le cadenas G1 pour une commande numérique Fanuc et une commande numérique Siemens très dynamique

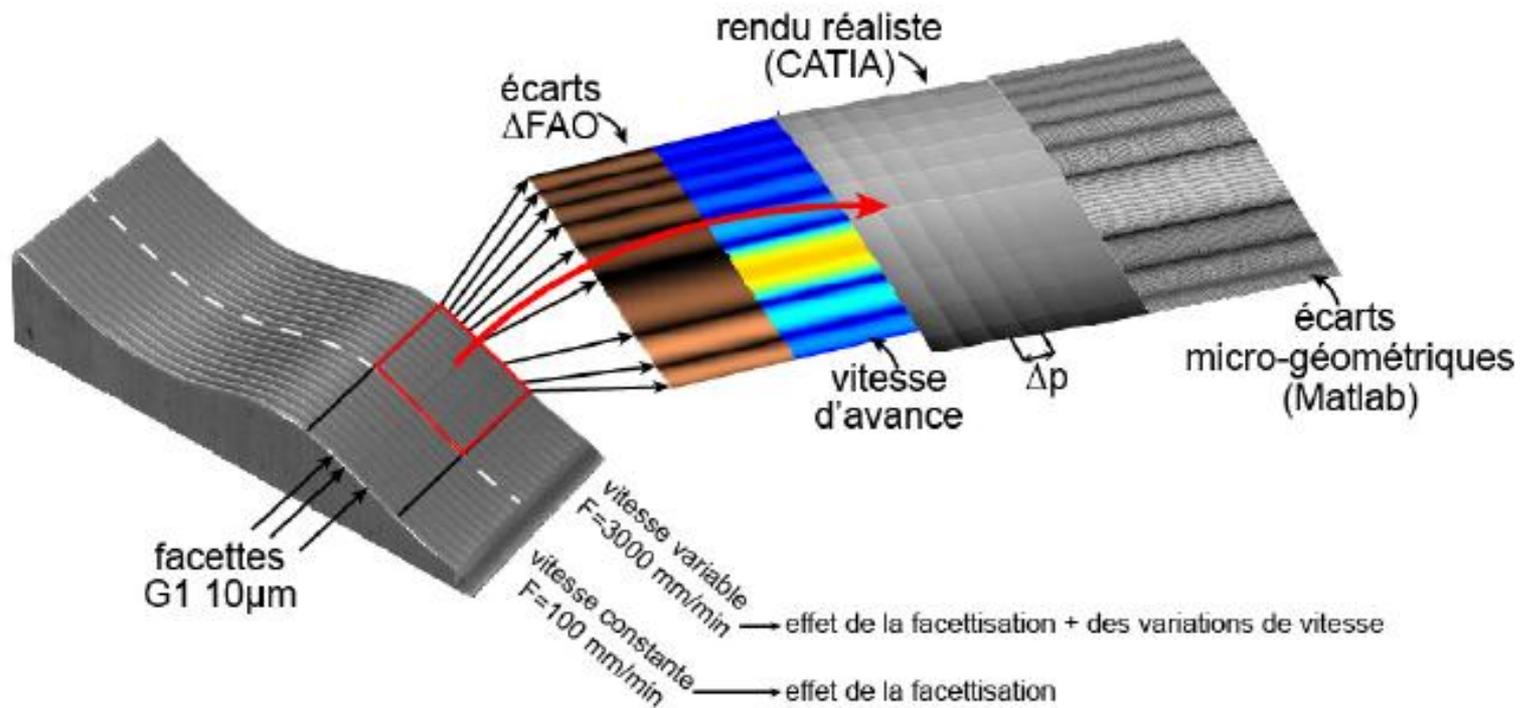
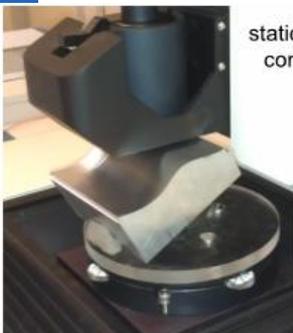
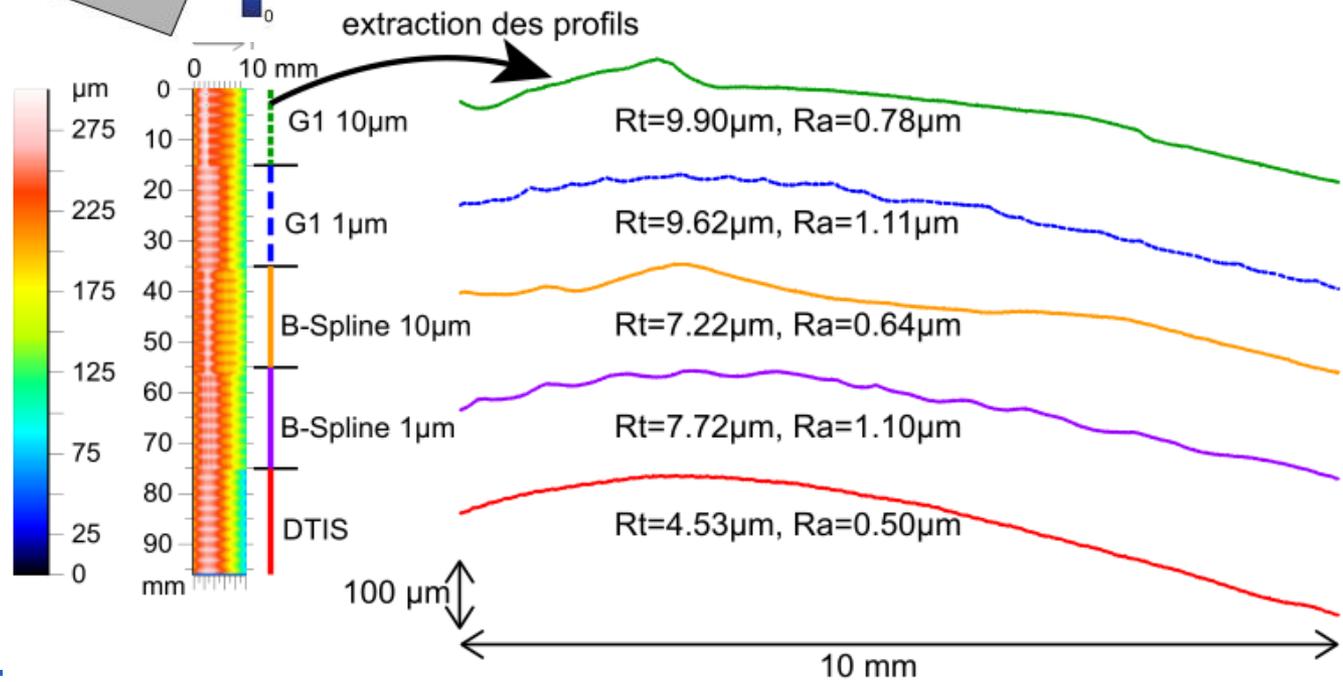
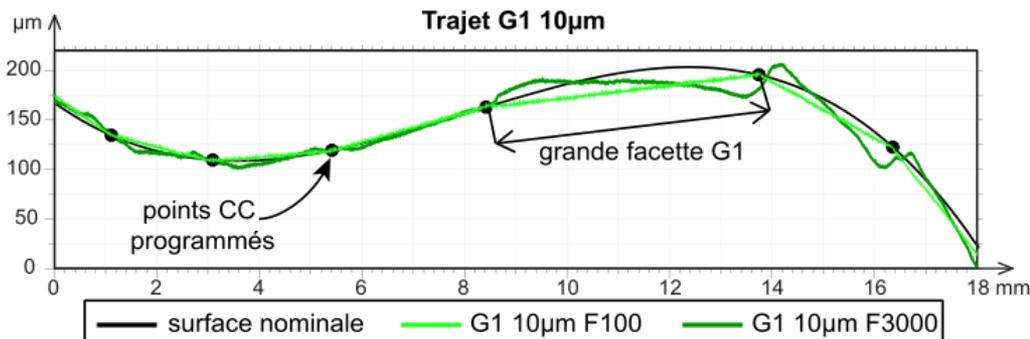
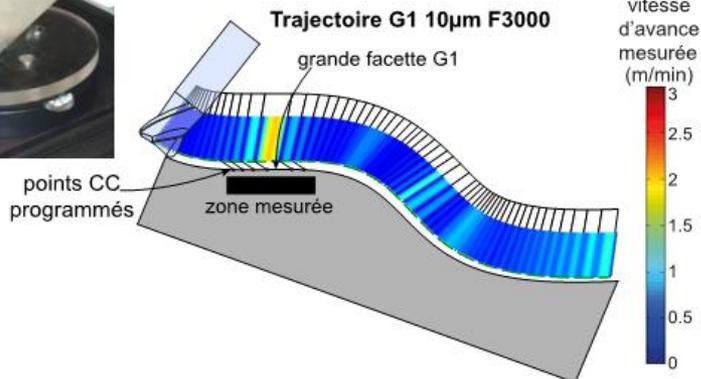


Figure 109 – Simulation des marques d’usinage pour le trajet G1  $10\mu m$

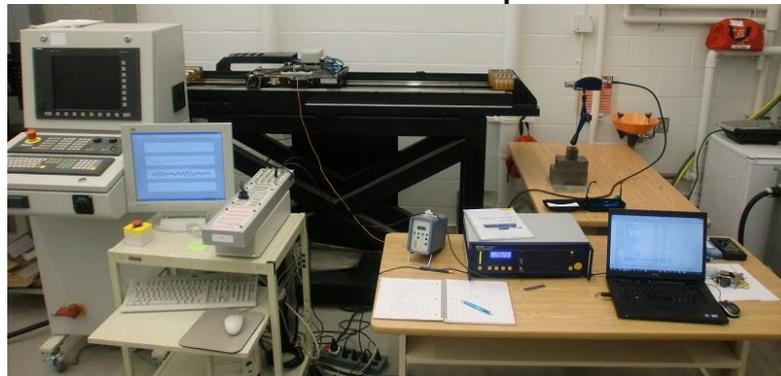
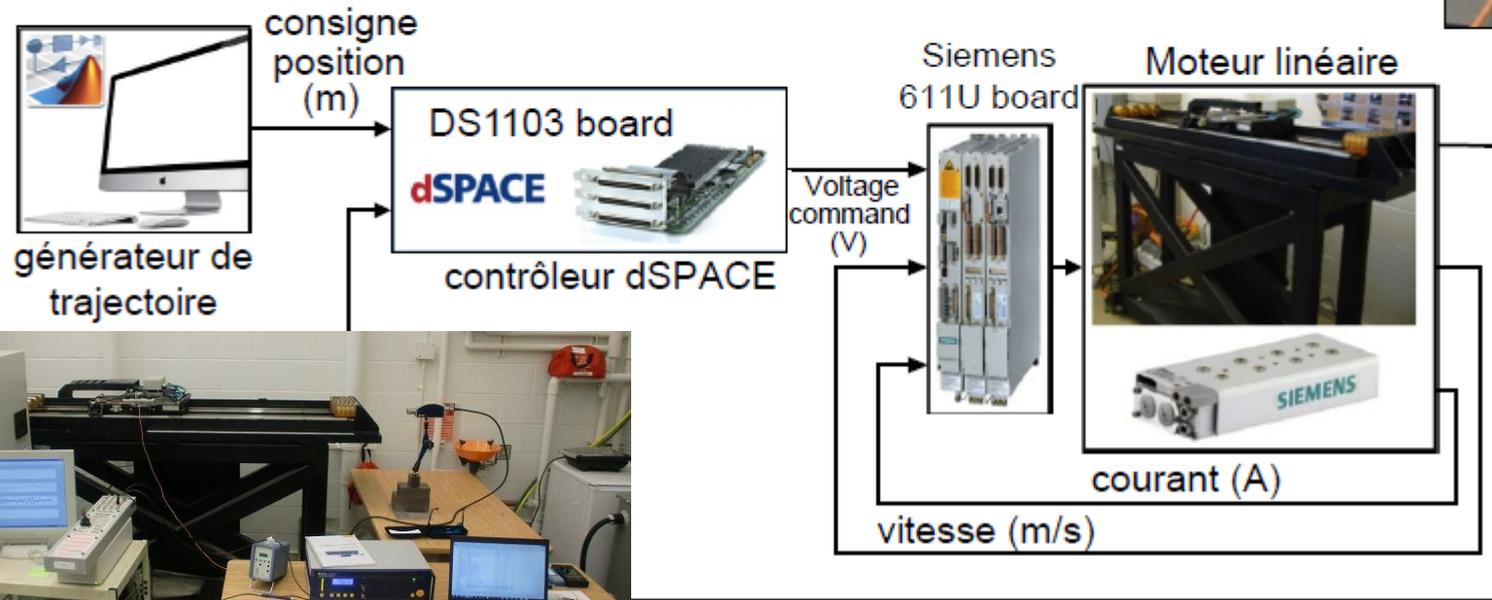
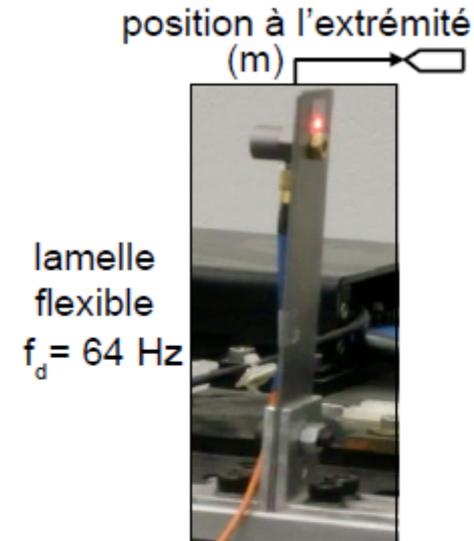
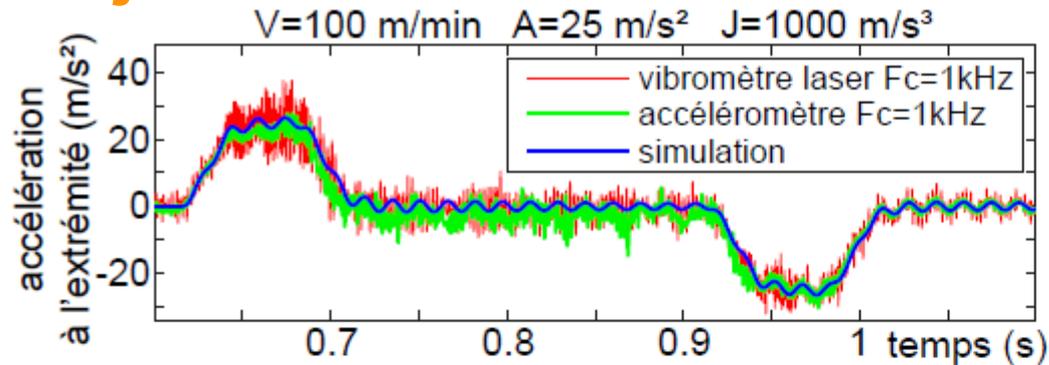
# Mesures Stil



station de mesure par imagerie confocale chromatique STIL

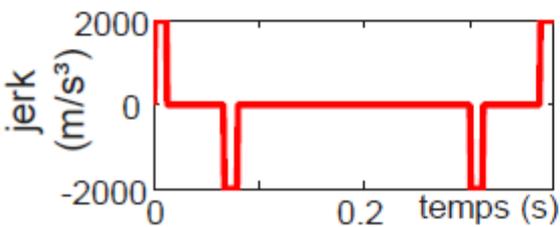
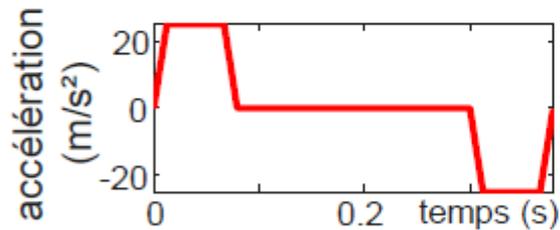
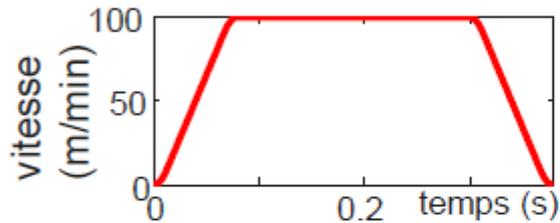
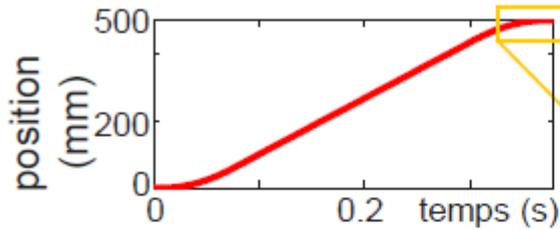


# Lien jerk - vibrations

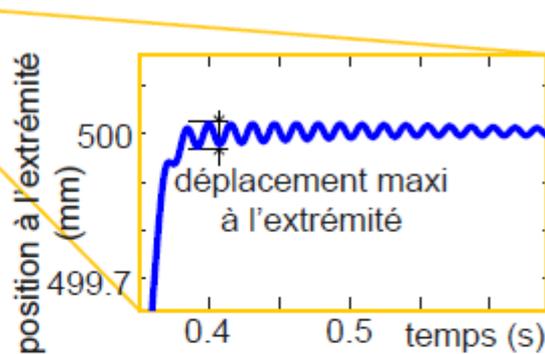


# Lien jerk - vibrations

commande envoyée  
au moteur linéaire



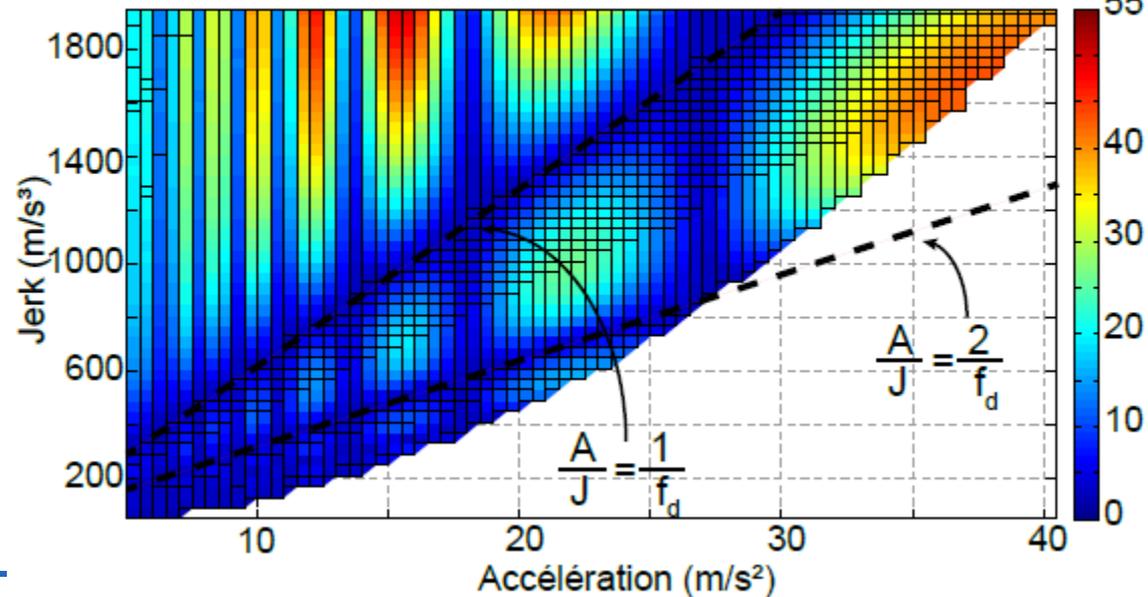
position simulée à  
l'extrémité de la lamelle



$$\frac{m/s^2}{m/s^3} = \frac{A}{J} = \frac{1}{f_d} \leftarrow \text{Hz}$$

Effet de l'accélération et du jerk  
sur le déplacement à l'extrémité  
V=50m/min

déplacement  
à l'extrémité  
( $\mu\text{m}$ )



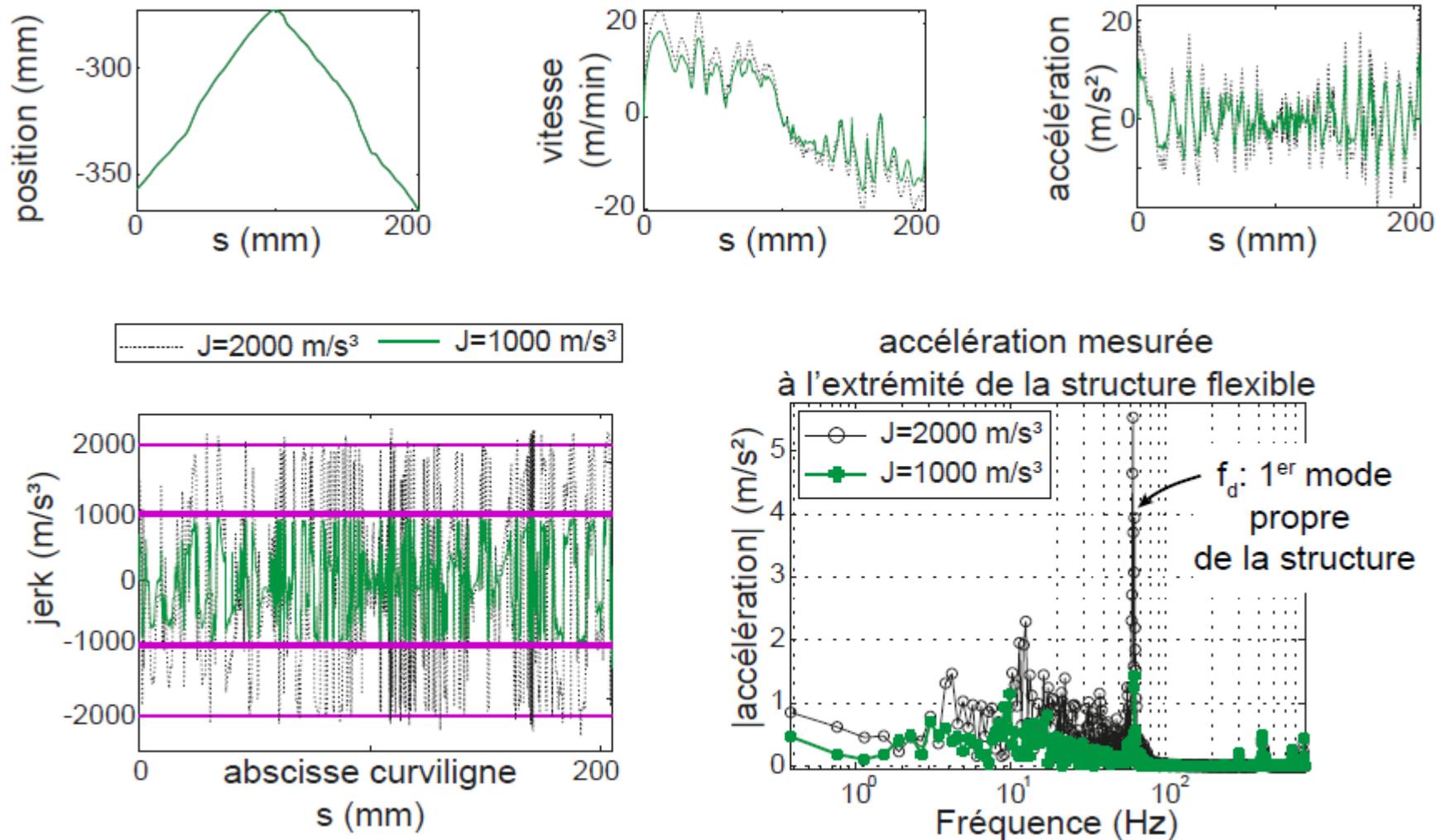


Figure 58 – Influence du jerk sur les vibrations pour une trajectoire complexe

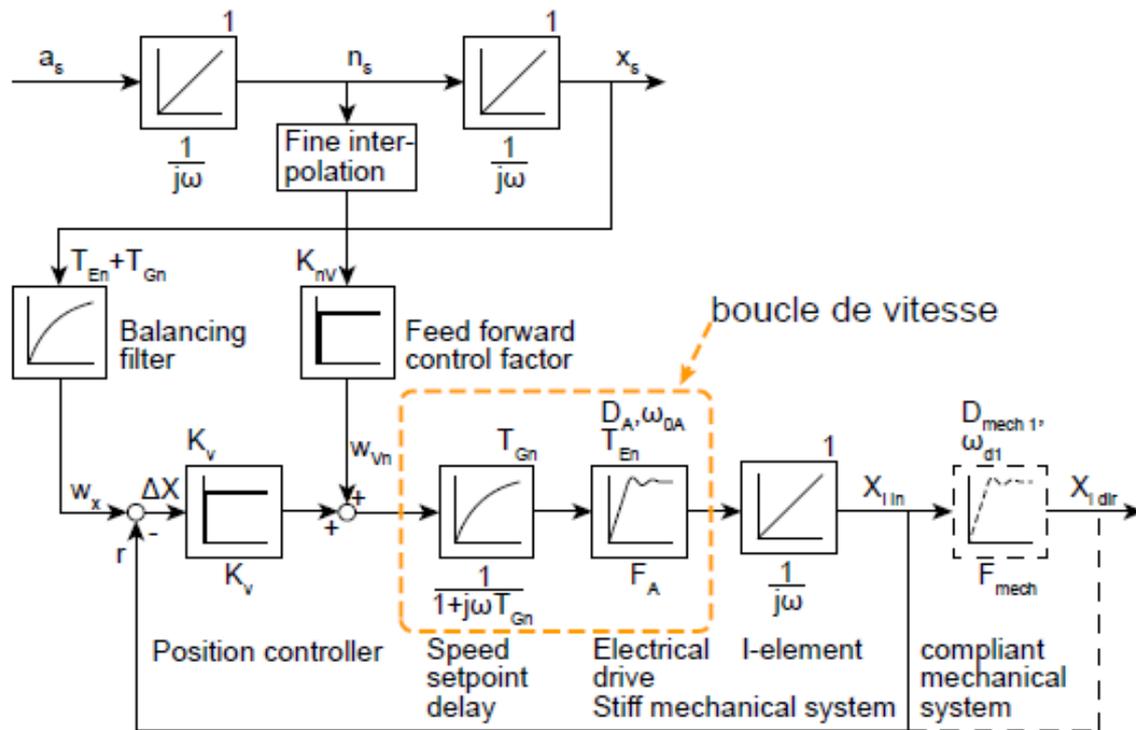


Figure 81 – Structure d’asservissement pour l’anticipation en vitesse [Groß *et al.*, 2001]

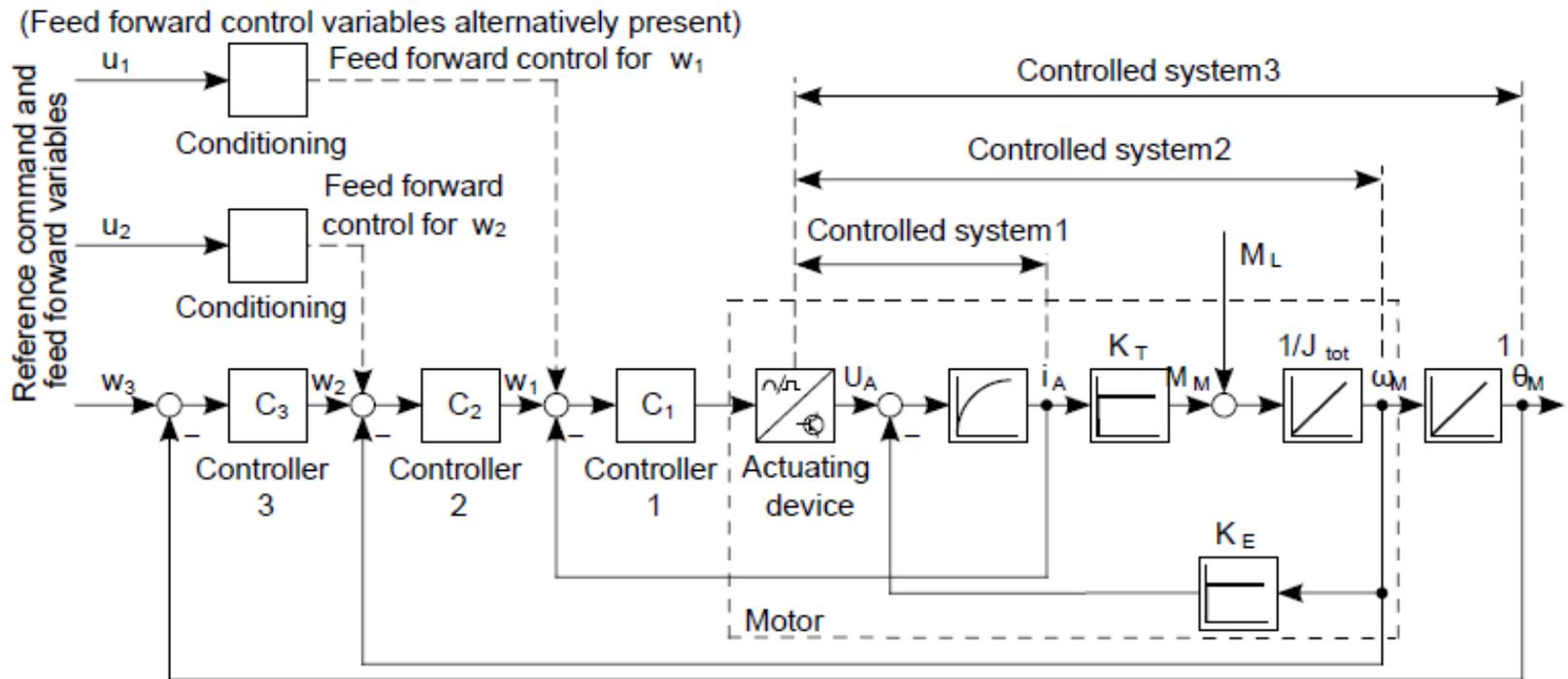


Figure 80 – Structure cascade avec anticipation [Groß *et al.*, 2001]