

Compensation active par action sur la rétroaction d'asservissement en position sur machine-outil 5 axes :

application à la correction géométrique de la structure.

## JOURNÉE DES DOCTORANTS



Flore Guevel

Direction : Guillaume Fromentin  
Co-encadrants : Fabien Viprey & Charly Euzenat



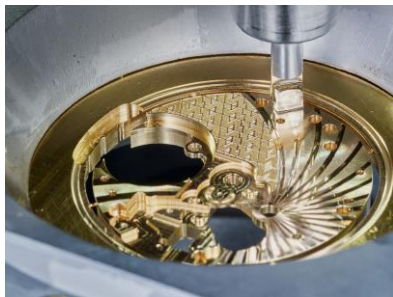
Ugo Masciantonio  
Romain Brault  
Laurent Lalliard

# Usinage haute précision

## Problématique



Expérience de cartographie des erreurs [Peng, 2013]



<https://willemin-macodel.com/en/watchmaking/>



Usinage électrochimique de précision - Cetim

On impose :

Des tolérances de l'ordre du  $\mu\text{m}$  ou rapport dimension/tolérance élevé

On souhaite :

Une haute exactitude du positionnement outil vis-à-vis de la pièce, dans tout l'espace de travail

On observe :

Des erreurs aléatoires et systématiques (géométriques, thermiques, dynamiques ...)

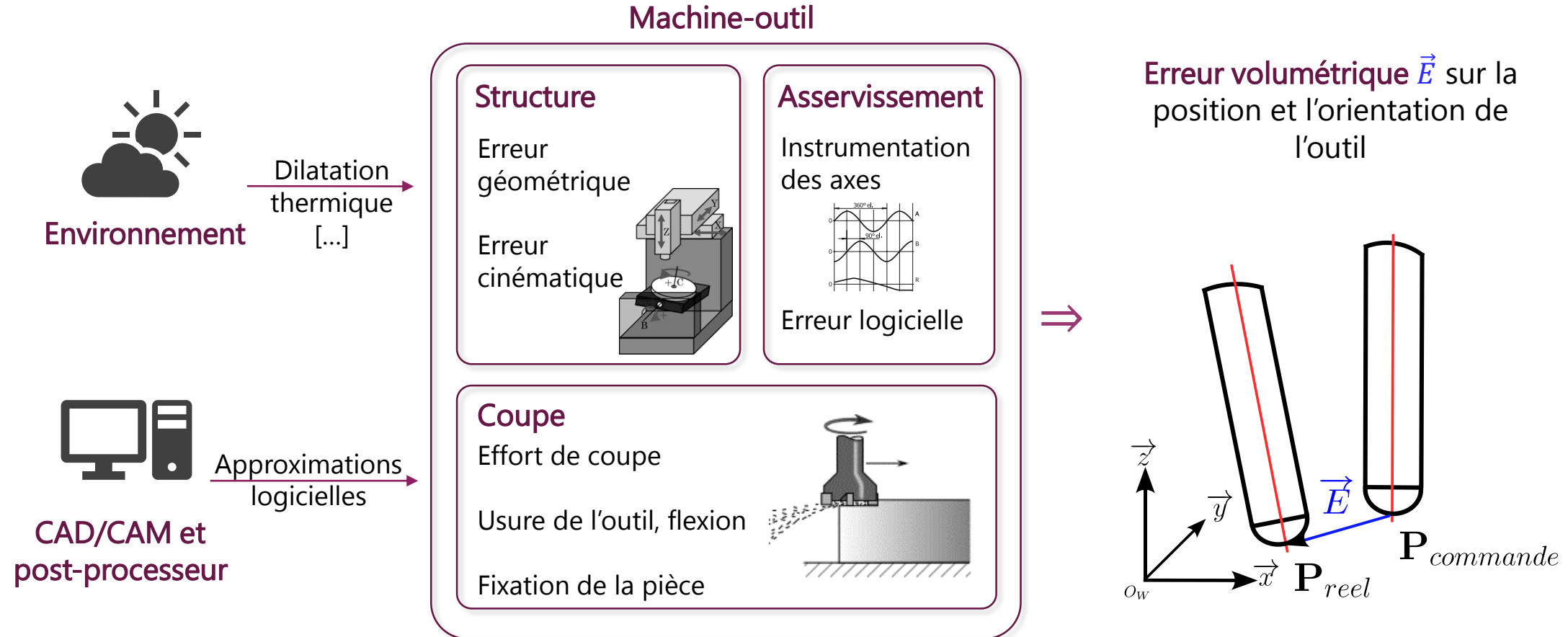
On doit :

**Compenser les erreurs**

# Sources d'erreur volumétrique sur MOCN

Problématique

Sources d'erreur



Les erreurs quasi-statiques (thermiques et géométriques) sont responsables en grande partie de l'erreur volumétrique finale (70% [Ramesh, 2000], entre 80% et 98% [Andolfatto, 2011])

# Comment compenser les erreurs systématiques ?

## Erreurs géométriques et thermiques

Problématique

Sources  
d'erreur

Compensation  
Méthodes

### Prévention [Ni,1997]

- Conception
- Réduction des sources de chaleur
- Contrôle du flux de chaleur
- Conception de structure robustes (thermique et dynamique)

### Compensation

#### Matérielle

- Pieds d'appui
- Mise en géométrie

#### Logicielle

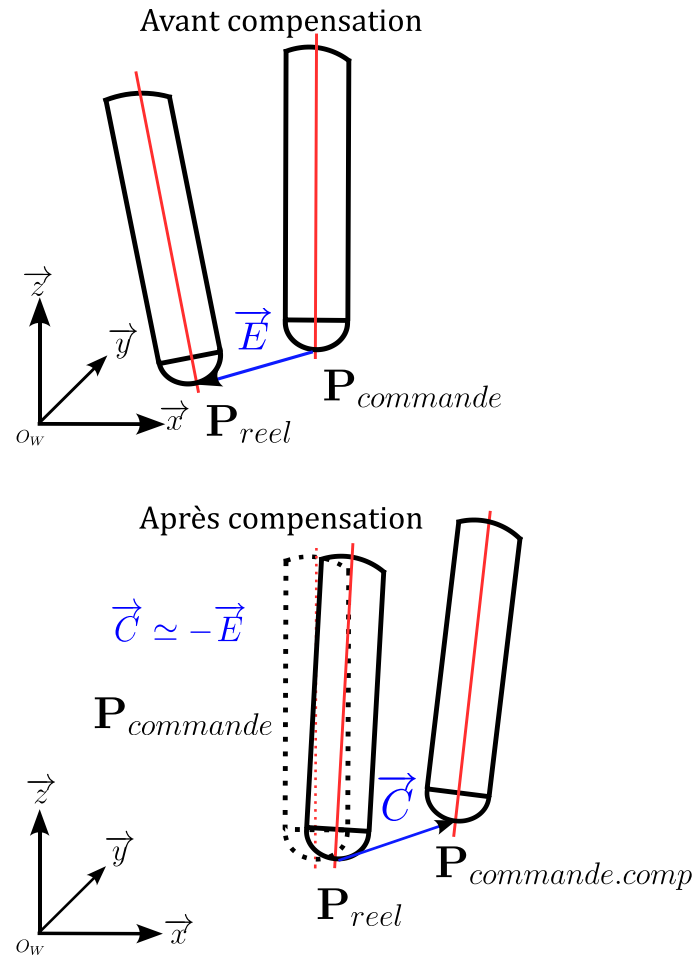
# Principe de la compensation logicielle sur MOCN

Problématique

Sources  
d'erreur

Compensation

Méthodes  
Principe



**Objectif** : anticiper les erreurs en modifiant la trajectoire outil

Définir un modèle d'erreur pour la machine outil

Mesurer les erreurs

Compenser les erreurs à partir du modèle

[Sartori, 1995]

# Comment compenser les erreurs systématiques ?

## Erreurs géométriques et thermiques

Problématique

Sources d'erreur

Compensation

Méthodes  
Principe

### Prévention [Ni,1997]

- Conception
- Réduction des sources de chaleur
- Contrôle du flux de chaleur
- Conception de structure robustes (thermique et dynamique)

### Compensation

#### Matérielle

- Pieds d'appui
- Mise en géométrie

#### Logicielle

#### Modifications du post- processeur ou des codes NC

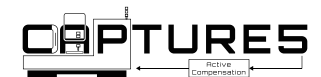
[Peng, 2013]  
[Mahbubur, 1997]  
[Hsu, 2007]  
[Wang, 2002]  
[Givi, 2016]

#### Modifications internes à la CN (ouverte)

[Lei, 2003]  
[Lei, 2007]  
[Longstaff, 2005]  
[Esmaeili, 2021]  
[Li, 2019]

#### Interception des signaux de retour codeurs

[Postlethwaite,  
1999]



# Objectif de la thèse : modification des signaux des codeurs sur le retour de position

**Objectif** : corriger les erreurs géométriques de façon totalement indépendante de la CN

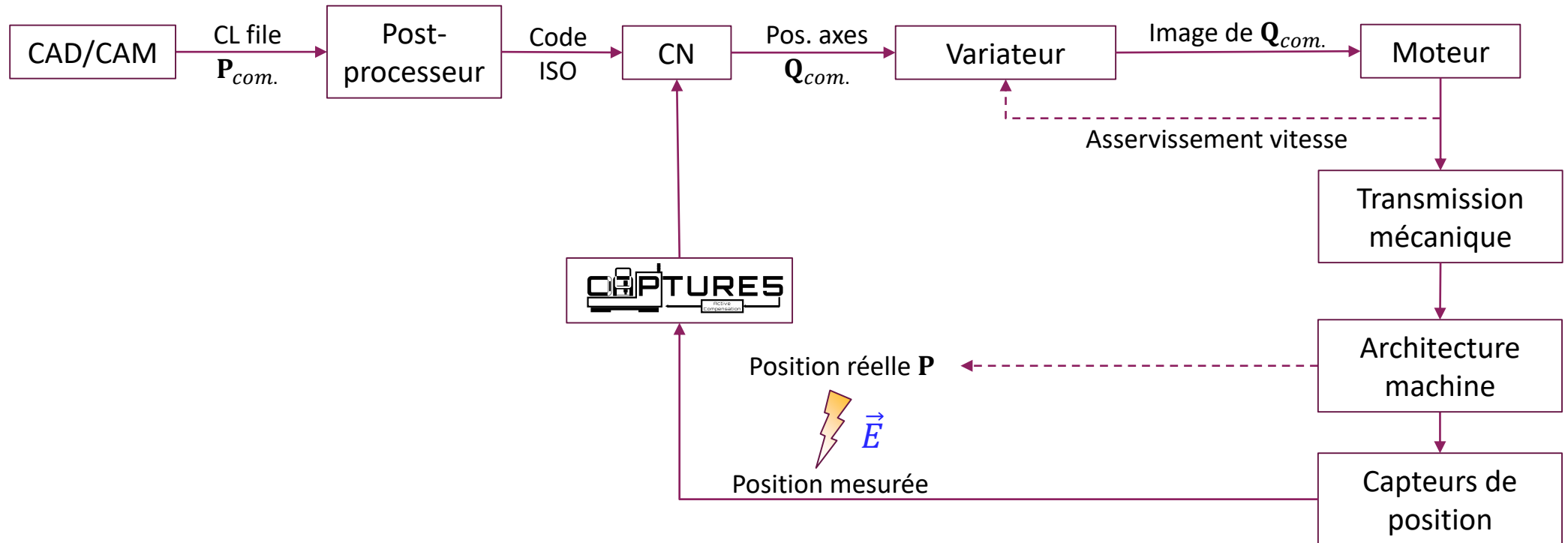
Problématique

Sources d'erreur

Compensation

Méthodes  
Principe

Projet de thèse  
Objectif



# Démarche scientifique

Problématique

Sources d'erreur

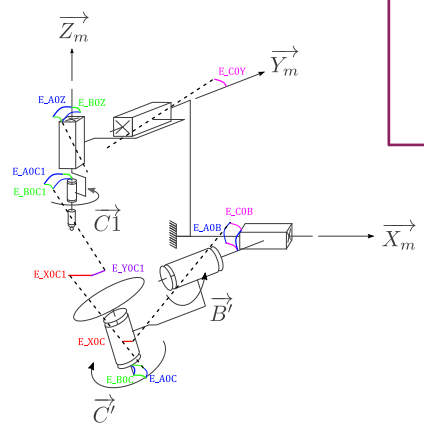
Compensation

Méthodes  
Principe

Projet de thèse

Objectif  
Démarche

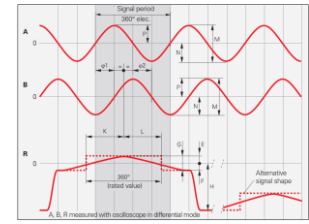
**Modélisation de la machine**  
**Identification des erreurs à compenser**



Erreur	Unité	Valeur de correction
E_A0Z	µm	0.000
E_B0Z	µm	0.000
E_C0Y	µm	0.000
E_A0C1	µm	0.000
E_B0C1	µm	0.000
E_X0C1	µm	0.000
E_Y0C1	µm	0.000
E_X0C	µm	0.000
E_B0C	µm	0.000
E_A0C	µm	0.000

**Test des méthodes de compensation sur 1 puis 3 puis 5 axes :**

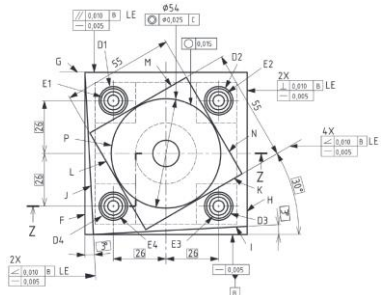
- Tables
- Modification codes CN



**Génération d'un signal codeur compensé**  
**Validation du bloc par expérimentations déportées**

**Validation de la stratégie par comparaison avec les autres (on/off) :**

- Mesures
- Usinage d'une pièce test







**Flore GUEVEL**

Doctorante

LaBoMaP- Equipe UGV

[flore.guevel@ensam.eu](mailto:flore.guevel@ensam.eu)

+33 6 28 79 43 53

Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers

Rue Porte de Paris

71250 Cluny

Merci pour votre attention !

Avez-vous des questions ?

## Références bibliographiques

[Ni, 1997]

Jun Ni, "CNC machine accuracy enhancement through realtime error compensation". Journal of Manufacturing Science and Engineering (NOVEMBER 1997, Vol. 119 / 717)

[Peng, 2013]

Peng, F.Y., J.Y. Ma, W. Wang, X.Y. Duan, P.P. Sun, et R. Yan. « Total Differential Methods Based Universal Post Processing Algorithm Considering Geometric Error for Multi-Axis NC Machine Tool ». International Journal of Machine Tools and Manufacture 70 (juillet 2013): 53-62. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2013.02.001>.

[Ramesh, 2000]

Ramesh, R, M A Mannan, et A N Poo. « Error Compensation in Machine Tools — a Review Part I: Geometric, Cutting-Force Induced and Fixture- Dependent Errors », s. d., 22.

[Esmaeili, 2021]

Esmaeili, Sareh M., et J.R.R. Mayer. « CNC Table Based Compensation of Inter-Axis and Linear Axis Scale Gain Errors for a Five-Axis Machine Tool from Symbolic Variational Kinematics ». CIRP Annals 70, no 1 (2021): 439-42. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2021.04.042>.

[Li, 2019]

Li, Jie, Bin Mei, Chaolin Shuai, Xin-jun Liu, et Dawei Liu. « A Volumetric Positioning Error Compensation Method for Five-Axis Machine Tools ». The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 103, no 9-12 (août 2019): 3979-89. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03745-8>.

[Mahbubur,  
1997]

Mahbubur, R.M.D., J. Heikkala, K. Lappalainen, et J.A. Karjalainen. « Positioning Accuracy Improvement in Five-Axis Milling by Post Processing ». International Journal of Machine Tools and Manufacture 37, no 2 (février 1997): 223-36. [https://doi.org/10.1016/0890-6955\(95\)00091-7](https://doi.org/10.1016/0890-6955(95)00091-7).

## Références bibliographiques

[Hsu, 2007]

Hsu, Y.Y., et S.S. Wang. « A New Compensation Method for Geometry Errors of Five-Axis Machine Tools ». International Journal of Machine Tools and Manufacture 47, no 2 (février 2007): 352-60.

[Wang, 2002]

Wang, Shih-Ming, Yuan-Liang Liu, et Yuan Kang. « An Efficient Error Compensation System for CNC Multi-Axis Machines ». International Journal of Machine Tools and Manufacture 42, no 11 (septembre 2002): 1235-45.  
[https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(02\)00053-6](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(02)00053-6).

[Givi, 2016]

Givi, Mehrdad, et J.R.R. Mayer. « Optimized Volumetric Error Compensation for Five-Axis Machine Tools Considering Relevance and Compensability ». CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 12 (janvier 2016): 44-55.  
<https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2015.09.002>.

[Postlethwaite, 1999]

S.R. Postlethwaite, D.G. Ford "A practical system for 5-axis volumetric compensation". Laser Metrology and Machine Performance, 1999

[Lei, 2007]

Lei, W. T., et M. P. Sung. « NURBS-Based Fast Geometric Error Compensation for CNC Machine Tools ». International Journal of Machine Tools and Manufacture 48, no 3 (1 mars 2008): 307-19. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2007.10.007>.

[Lei, 2003]

Lei, W T, et Y Y Hsu. « Accuracy Enhancement of Five-Axis CNC Machines through Real- Time Error Compensation », 2003, 7.

Longstaff, Andrew P, Simon Fletcher, et Alan Myers. « VOLUMETRIC COMPENSATION FOR PRECISION MANUFACTURE THROUGH A STANDARD CNC CONTROLLER », s. d., 6.

## Références bibliographiques

[Longstaff,  
2005]

Longstaff, Andrew P, Simon Fletcher, et Alan Myers. « VOLUMETRIC COMPENSATION FOR PRECISION MANUFACTURE THROUGH A STANDARD CNC CONTROLLER », s. d., 6.

[Andolfatto,  
2011]

Andolfatto, L., S. Lavernhe, et J.R.R. Mayer. « Evaluation of Servo, Geometric and Dynamic Error Sources on Five-Axis High-Speed Machine Tool ». International Journal of Machine Tools and Manufacture 51, n° 10-11 (octobre 2011): 787-96. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2011.07.002>.

[Sartori, 1995]

Sartori, S., et G.X. Zhang. « Geometric Error Measurement and Compensation of Machines ». CIRP Annals 44, n° 2 (1995): 599-609. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60507-1](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60507-1).