

Un séminaire ISA-France
en partenariat avec l'ISTIA

Maîtrise et optimisation des processus complexes

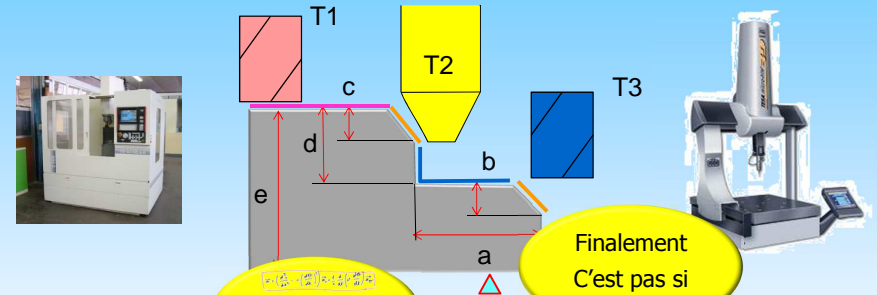
Angers – Mercredi 22 octobre 2014

Pilotage complexe de machines à commande numériques multiaxes Pilotage inertiel total

Maurice Pillet* – Eric Pairel
Université de Savoie Mont Blanc

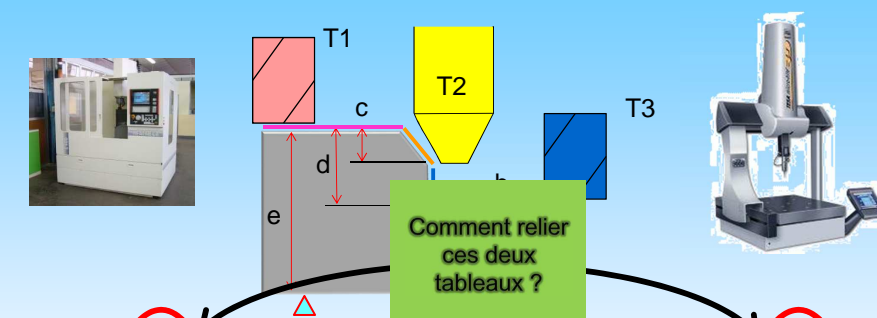
*Directeur de Recherche au laboratoire SYMME

Le problème



Outils	Vecteur d'action	Cible	Tolérances	Mesure	Ecart
		a	5	±0.1	-0.03
Outil 1	L1	b	1	±0.2	-0.21
Outil 2	L2	c	1	±0.2	0.05
Outil 3	L3	d	3	±0.1	0.12
Outil 3	D3	e	6	±0.3	0.1

Le problème



Outils	Vecteur d'action	Caractéristiques	Cible	Tolérances	Mesure	Ecart
		a	5	±0.1	4.7	-0.3
Outil 1	L1	b	1	±0.2	0.90	-0.10
Outil 2	L2	c	1	±0.2	1.4	0.4
Outil 3	L3	d	3	±0.1	3.08	0.08
Outil 3	D3	e	6	±0.3	6.5	0.50

Introduction

- Principe général de pilotage – Niveau complexe

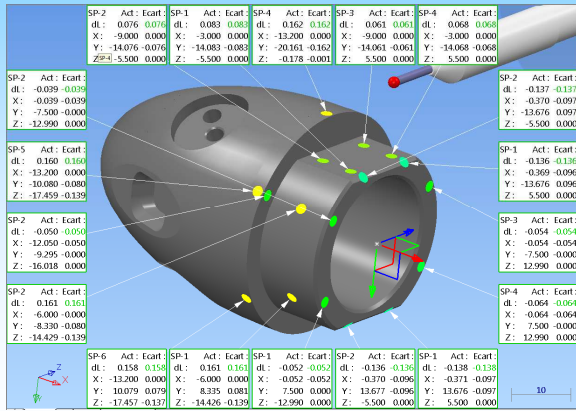
Réglage quasi impossible de tête. Une assistance informatique est forcément nécessaire!!

Mesurer → Déterminer correction → Corriger

Ex: Pièces complexes avec formes gauches (médical, dentaire,...)

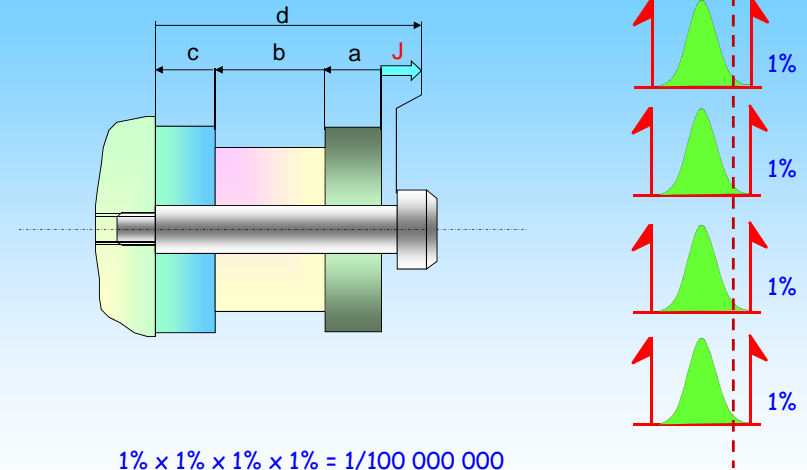
Introduction – Que faire avec des écarts sur des points ?

Comment exploiter l'information des écarts sur les points?

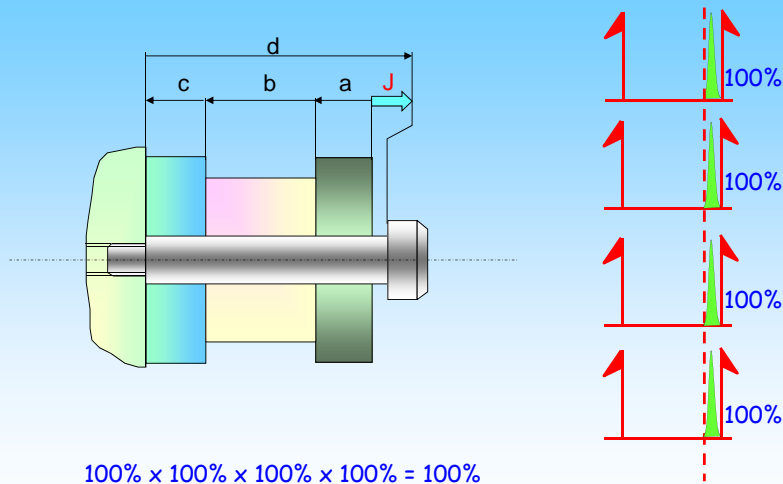


5

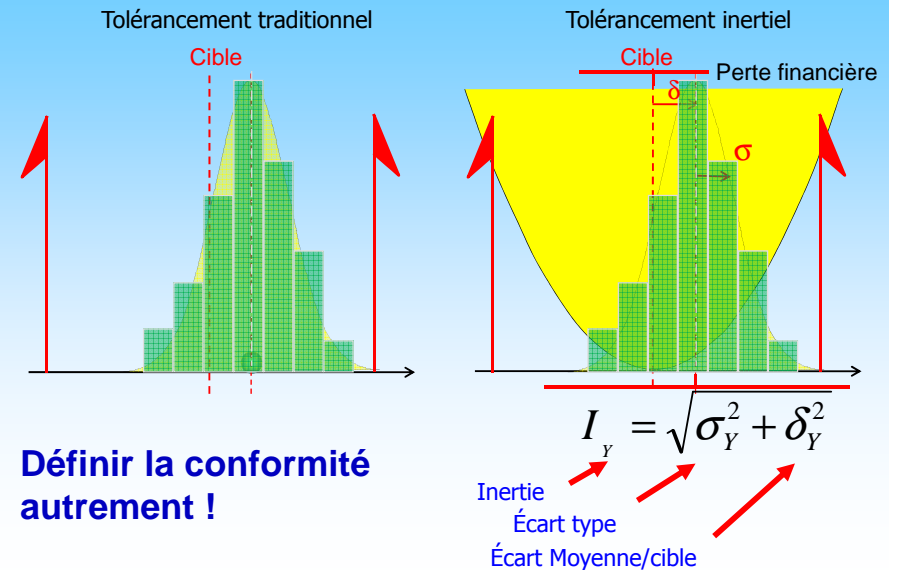
La Conformité ?



Oui Mais !

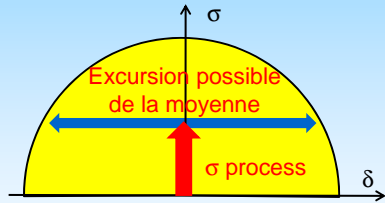


L'inertie – le tolérancement du 21^{ème} siècle ?



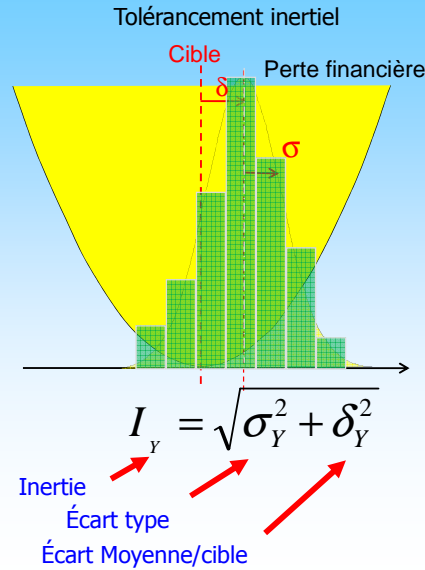
Définir la conformité autrement !

L'inertie – le tolérancement du 21^{ème} siècle ?

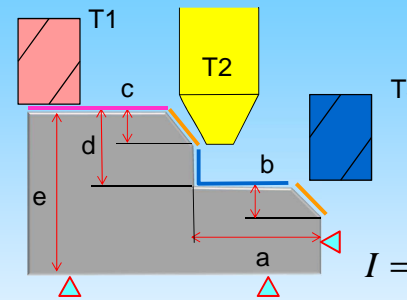


Limiter $\sigma \rightarrow$ limiter la variabilité
 Limiter $\delta \rightarrow$ centrer les process

L'un et l'autre pouvant se compenser



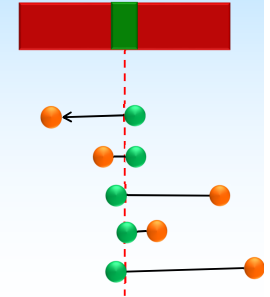
Minimiser les inerties



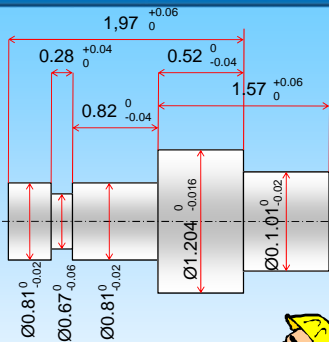
Outils	Vecteur d'action
Outil 1	L1
Outil 2	L2
Outil 3	L3
Outil 3	D3

$$I = \sqrt{\sigma^2 + \delta^2}$$

Caractéristiques	Cible	Tolérances	Mesure	Ecart
a	5	±0.1	4.7	-0.30
b	1	±0.2	0.90	-0.10
c	1	±0.2	1.4	0.40
d	3	±0.1	3.08	0.08
e	6	±0.3	6.5	0.50

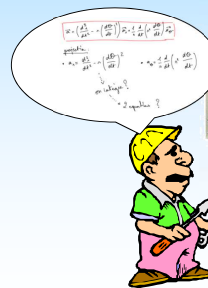


Niveaux de pilotage – Niveau 0

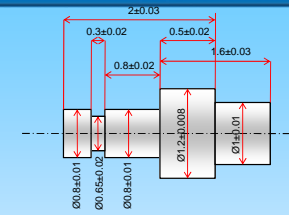


Niveau 0 :
 Les cotes sont non centrées
 On fournit un plan

Le régleur se débrouille



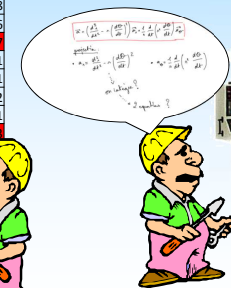
Niveaux de pilotage – Niveau 1



Niveau 1 :
 Les cotes sont centrées
 On fournit un vecteur des écarts

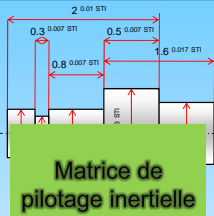
Le régleur se débrouille

Cotes	Cible	Valeurs	écart
1 Longueur 2±0,03	2	2,011	0,011
2 Longueur 0,3±0,02	0,3	0,318	0,018
3 Longueur 0,8±0,02	0,8	0,806	0,006
4 Longueur 0,5±0,02	0,5	0,473	-0,027
5 Longueur 1,6±0,03	1,6	1,601	0,001
6 Diam 0,65±0,02	0,65	0,651	0,001
7 Diam 1 0,8±0,01	0,8	0,802	0,002
8 Diam 2 0,8±0,01	0,8	0,801	0,001
9 Diam 1,2±0,008	1,2	1,213	0,013
10 Diam 1±0,01	1	1,006	0,006



Niveaux de pilotage – Niveau 2

Cotes	Cible	Valeurs	écart
1 Longueur 2± 0,03	2	2,011	0,011
2 Longueur 0,3±0,02	0,3	0,318	0,018
3 Longueur 0,8±0,02	0,8	0,806	0,006
4 Longueur 0,5±0,02	0,5	0,473	-0,027
5 Longueur 1,6 ±0,03	1,6	1,601	0,001
6 Diam 0,65±0,02	0,65	0,651	0,001
7 Diam1 0,8±0,01	0,8	0,802	0,002
8 Diam2 0,8±0,01	0,8	0,801	0,001
9 Diam 1,2±0,008	1,2	1,213	0,013
10 Diam 1±0,01	1	1,006	0,006



Identification des correcteurs	Corrections à apporter
J1	0
C2	-0,033
C3	-0,083
C4	-0,009
C5	0,002
C6	-0,027
D 0,65	0
D 0,8	0,008
D 1,2	-0,013
D 1	-0,006

Relation déterministe

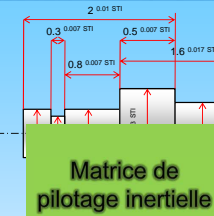
Le règleur est assisté
On pilote l'inertie sur l'ensemble des caractéristiques

- Pour le choix des corrections
- Le signe de la correction
- La valeur
- Les relations entre plusieurs corrections



Niveaux de pilotage – Niveau 3

Cotes	Cible	Valeurs	écart
1 Longueur 2± 0,03	2	2,011	0,011
2 Longueur 0,3±0,02	0,3	0,318	0,018
3 Longueur 0,8±0,02	0,8	0,806	0,006
4 Longueur 0,5±0,02	0,5	0,473	-0,027
5 Longueur 1,6 ±0,03	1,6	1,601	0,001
6 Diam 0,65±0,02	0,65	0,651	0,001
7 Diam1 0,8±0,01	0,8	0,802	0,002
8 Diam2 0,8±0,01	0,8	0,801	0,001
9 Diam 1,2±0,008	1,2	1,213	0,013
10 Diam 1±0,01	1	1,006	0,006

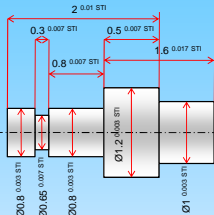


Identification des correcteurs	Corrections à apporter
J1	0
C2	-0,033
C3	-0,083
C4	-0,009
C5	0,002
C6	-0,027
D 0,65	0
D 0,8	0,008
D 1,2	-0,013
D 1	-0,006



Principe du pilotage inertiel

Cotes	Cible	Valeurs	écart
1 Longueur 2± 0,03	2	2,011	0,011
2 Longueur 0,3±0,02	0,3	0,318	0,018
3 Longueur 0,8±0,02	0,8	0,806	0,006
4 Longueur 0,5±0,02	0,5	0,473	-0,027
5 Longueur 1,6 ±0,03	1,6	1,601	0,001
6 Diam 0,65±0,02	0,65	0,651	0,001
7 Diam1 0,8±0,01	0,8	0,802	0,002
8 Diam2 0,8±0,01	0,8	0,801	0,001
9 Diam 1,2±0,008	1,2	1,213	0,013
10 Diam 1±0,01	1	1,006	0,006



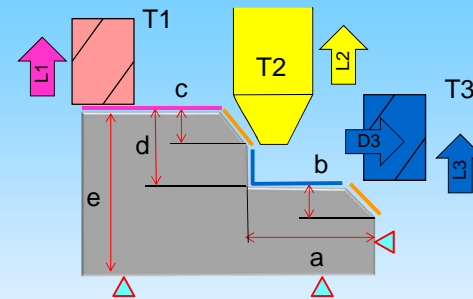
Identification des correcteurs	Corrections à apporter
J1	0
C2	-0,033
C3	-0,083
C4	-0,009
C5	0,002
C6	-0,027
D 0,65	0
D 0,8	0,008
D 1,2	-0,013
D 1	-0,006

Trouver une relation linéaire entre l'action du correcteur et le résultat sur la cote

Inverser la relation



Matrice d'incidence




Outils	Vecteur d'action
Outil 1	L1
Outil 2	L2
Outil 3	L3
Outil 3	D3

Caractéristiques	L1	L2	L3	D3
a	0	0	0	-1
b	0	-1	1	0
c	1	-1	0	1
d	1	0	-1	0
e	1	0	0	0

Matrice de pilotage inertielle

$$E = \begin{matrix} & X & & C \\ \begin{matrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & & \begin{matrix} L1 \\ L2 \\ L3 \\ D3 \end{matrix} \end{matrix}$$

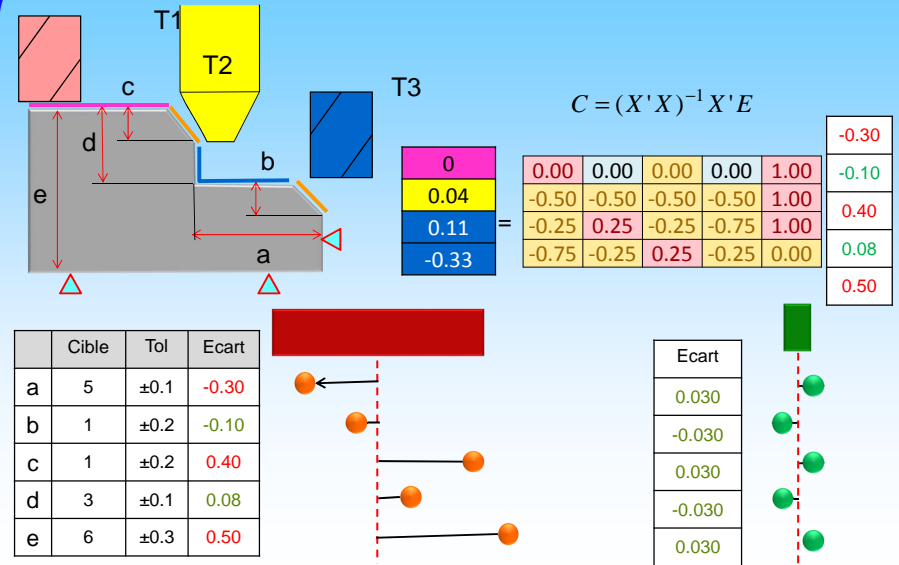
La solution bien connue ! (Depuis Gauss)



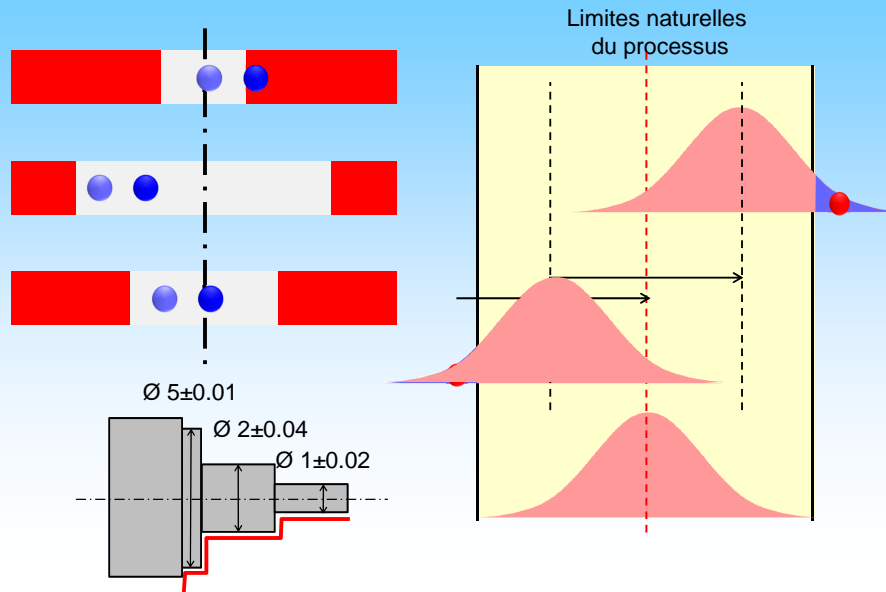
$$C = (X'X)^{-1}X'E$$

L1	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	a
L2	-0.50	-0.50	-0.50	-0.50	1.00	b
L3	-0.25	0.25	-0.25	-0.75	1.00	c
D3	-0.75	-0.25	0.25	-0.25	0.00	d
						e

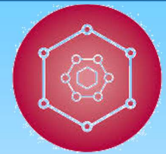
Minimiser les inerties



Quelques problèmes à résoudre



Les principales méthodes



- Standardisation des écarts
- Stratégie de filtrage
- Pilotage inertiel pondéré
- Pilotage par T²
- Equilibrage des matrices
- Déréglage le plus probable

....

Optimisation : dérèglement le plus probable

L1	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00
L2	-0.50	-0.50	-0.50	-0.50	1.00
L3	-0.25	0.25	-0.25	-0.75	1.00
D3	-0.75	-0.25	0.25	-0.25	0.00

- a
- b
- c
- d
- e

Quelles sont toutes les combinaisons de réglages possibles ?

Diagram showing various combinations of L1, L2, L3, and D3 settings.

Dérèglement le plus probable

L1 = 0.00 0.00 0.33 0.33 0.33

Ecart	
a	-0.30
b	-0.10
c	0.40
d	0.08
e	0.50

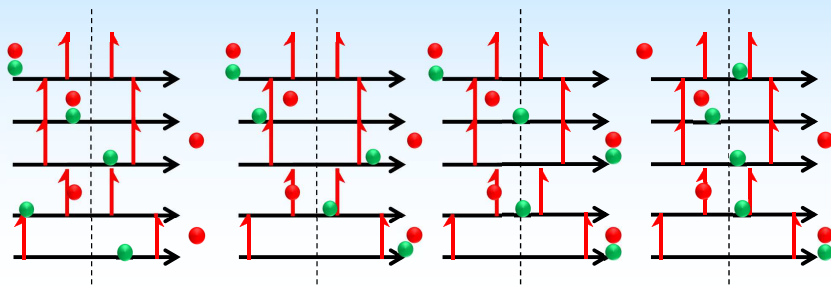
Diagram showing the relationship between L1, L2, L3, D3 settings and their corresponding delta values (Δa, Δb, Δc, Δd, Δe).

Dérèglement le plus probable

Diagram showing four settings: L1 (-0.33), L2 (0.15), L3 (0.09), and D3 (-0.35).

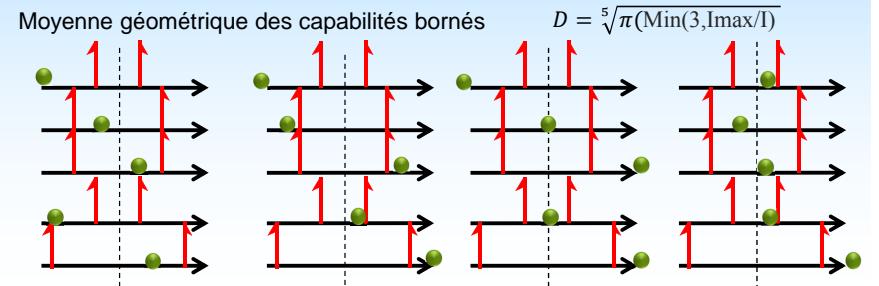
±0.1	a	-0.300
±0.2	b	-0.100
±0.2	c	0.073
±0.1	d	-0.247
±0.3	e	0.173

Quel est la situation la plus favorable ?



Dérèglement le plus probable

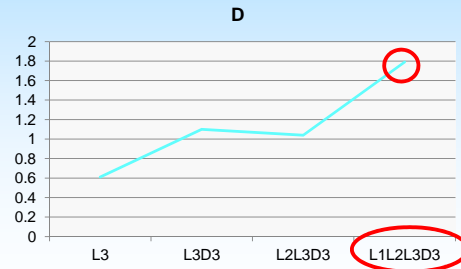
Tol	cote	écart	Min(3.I _{max} /D)
±0.1	a	-0.300	0.111
±0.2	b	-0.100	0.667
±0.2	c	0.073	0.913
±0.1	d	-0.247	0.135
±0.3	e	0.173	0.578
D			0.35
D borné			0.35



Dérégage le plus probable

Moyenne des mesures	Indicateur moy	Ecart	Ecart filtré pondéré	Etendue des mesures	-1	0	1	Identification des correcteurs	Valeur initiale du correcteur	Corrections à apporter	nouvelle valeur	écart attendu	-1	0	1
4.7	-0.300	-0.300	0								5.030	0.030			
0.9	-0.100	-0.100	0					L1	0.000	-0.500	0.970	-0.030			
1.4	0.400	0.400	0					L2	0.000	-0.460	1.030	0.030			
3.08	0.080	0.080	0					L3	0.000	-0.390	2.970	-0.030			
6.5	0.500	0.500	0					D3	0.000	-0.330	6.000	0.000			

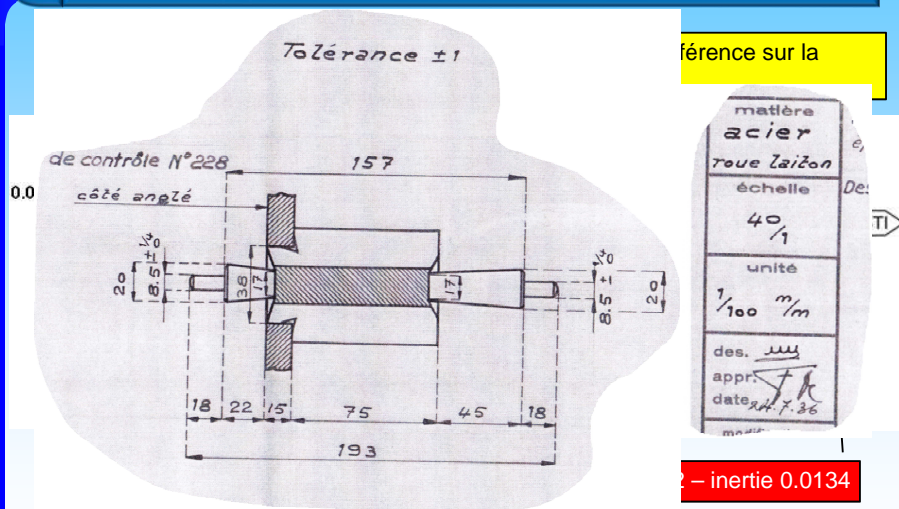
Réglage	D
D3	0.55
L3D3	1.10
L2L3D3	1.04
L1L2L3D3	1.79



Dérégage le plus probable

Application à l'inertiel total

Un exemple de pièce tolérancée en inertie totale



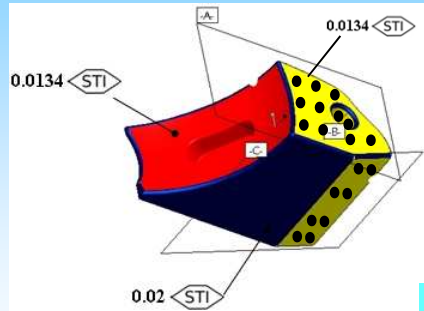
La référence de la pièce est déterminée par ABC

Unité fonctionnelle 1 – inertie 0.02

Libérer l'imagination !



Métrie



1. On positionne le repère de référence (balanage ou posage)
2. On mesure des points équi-répartis sur l'ensemble de la surface **jaune**.
3. On mesure l'écart à la cible selon la normale à la surface
4. On estime l'inertie de l'unité fonctionnelle jaune sur l'ensemble des points palpés par la relation

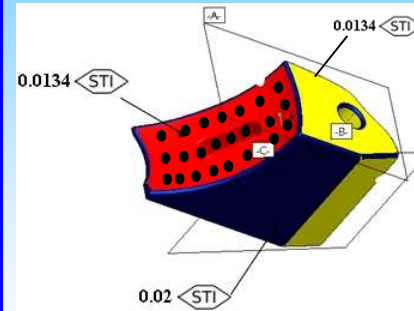
$$\hat{I} = \sqrt{x^{-2} + S^2}$$

Moyenne

Ecart type

5. On accepte si l'inertie est inférieure à 0.0134

Métrie



1. On positionne le repère de référence (balanage ou posage)
2. On mesure des points équi-répartis sur l'ensemble de la surface **rouge**.
3. On mesure l'écart à la cible selon la normale à la surface
4. On estime l'inertie de l'unité fonctionnelle jaune sur l'ensemble des points palpés par la relation

$$\hat{I} = \sqrt{x^{-2} + S^2}$$

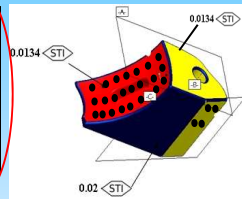
Moyenne

Ecart type

5. On accepte si l'inertie est inférieure à 0.0134

Le problème du pilotage

Pts	X	Y	Z	NX	NY	NZ	écart
1	12.3	2.5	25.0	1	0	0	0,011
2	14.3	9.6	24.1	1	0	0	0,018
3	15.3	5.3	15.2	0	1	0	0,006
...
126	42.5	12.3	15.3	0	0.7	0.7	0,001
127	52.3	12.3	15.2	0.7	0.7	0	0,002
1288	12.3	26.3	36.2	0.3	0.2	0.93	0,001

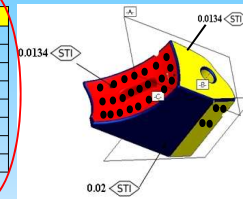


Identification des correcteurs	Corrections à apporter
J1	0
C2	-0,033
C3	-0,083
C4	-0,009
C5	0,002
C6	-0,027
D 0,65	0
D 0,8	0,008
D 1,2	-0,013
D 1	-0,006

Problème difficile

La solution

Pts	X	Y	Z	NX	NY	NZ	écart
1	12.3	2.5	25.0	1	0	0	0,011
2	14.3	9.6	24.1	1	0	0	0,018
3	15.3	5.3	15.2	0	1	0	0,006
...
126	42.5	12.3	15.3	0	0.7	0.7	0,001
127	52.3	12.3	15.2	0.7	0.7	0	0,002
1288	12.3	26.3	36.2	0.3	0.2	0.93	0,001

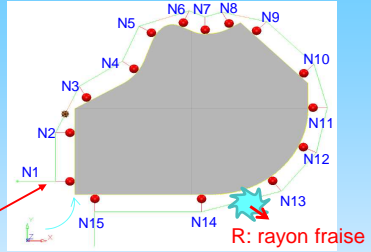


Identification des correcteurs	Corrections à apporter
J1	1
C2	0
C3	0
C4	0
C5	0
C6	0
D 0,65	0
D 0,8	0
D 1,2	0
D 1	0

Le paramétrage des caractéristiques est désormais inutile, il nous fait perdre de la précision de réglage !

L1	=	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	e ₁
L2		-0.50	-0.50	-0.50	-0.50	1.00	e ₂
...	
Lk		-0.75	-0.25	0.25	-0.25	0.00	e _n

Exemple de calcul

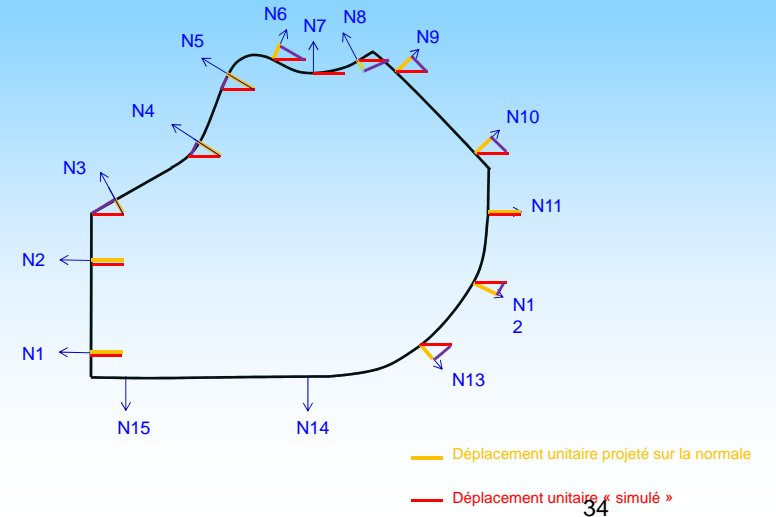


Coord. X	Coord. Y	Coord. Z	Norm. I	Norm. J	Norm. K	Surface	Nom du Point	Ecart	Corrections
0.000	3.065	7.500	-1.000	0.000	0.000	S1	N1	-0.05	TX
0.000	14.364	7.500	-1.000	0.000	0.000	S1	N2	0.1	TY
2.950	21.703	7.500	-0.500	0.866	0.000	S1	N3	0.05	RZ
13.182	28.633	7.500	-0.807	0.590	0.000	S1	N4	0.2	R
16.874	37.090	7.500	-0.860	0.510	0.000	S1	N5	0.3	
22.292	39.039	7.500	0.405	0.914	0.000	S1	N6	0.8	
27.284	37.286	7.500	-0.031	1.000	0.000	S1	N7	0.8	
32.742	38.904	7.500	-0.500	0.866	0.000	S1	N8	0.8	
37.285	37.356	7.500	0.707	0.707	0.000	S1	N9	1.2	
47.152	27.489	7.500	0.707	0.707	0.000	S1	N10	1.4	
48.783	20.200	7.500	1.000	0.000	0.000	S1	N11	1.2	
46.869	11.463	7.500	0.904	-0.427	0.000	S1	N12	0.8	
40.769	3.990	7.500	0.599	-0.801	0.000	S1	N13	0.5	
26.500	0.000	7.500	0.000	-1.000	0.000	S1	N14	0.1	
4.222	0.000	7.500	0.000	-1.000	0.000	S1	N15	0.4	

Corrections
TX
TY
RZ
R

Type d'incidence des correcteurs

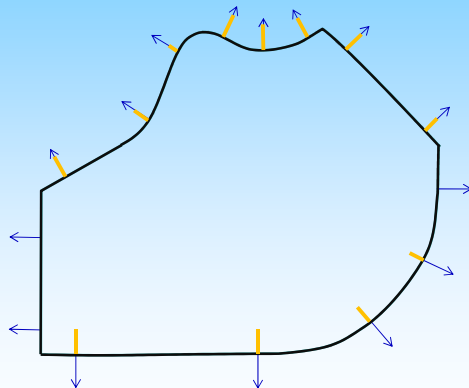
Translation suivant X



34

Type d'incidence des correcteurs

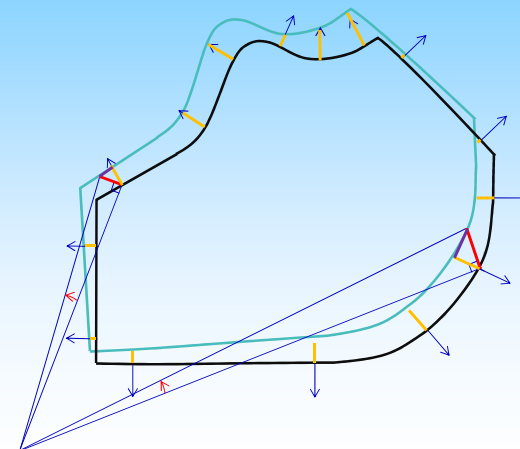
Translation suivant Y



35

Type d'incidence des correcteurs

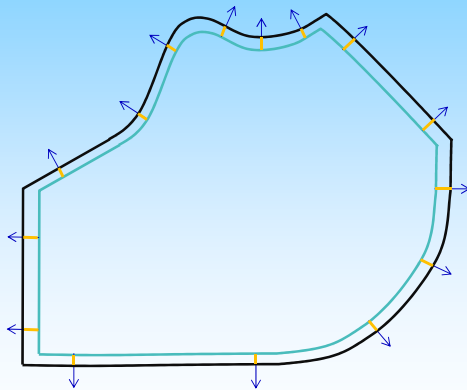
Rotation autour du centre du repère



36

Type d'incidence des correcteurs

Taille

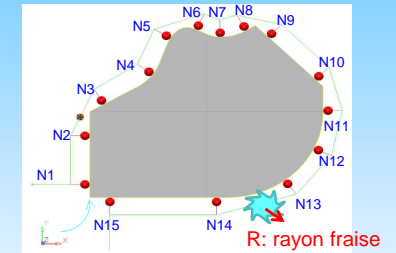


37

Matrices d'incidence / de pilotage

MI Matrice d'incidence

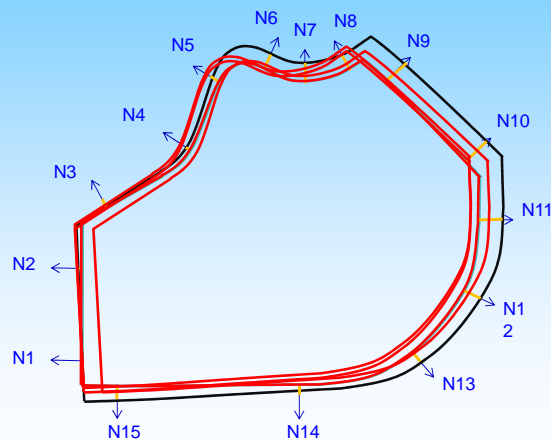
		TX	TY	Form	Rot
S1	P1	-1	0	1	3.065
S1	P2	-1	0	1	14.364
S1	P3	-0.5	0.866	1	13.4062
S1	P4	-0.807	0.59	1	30.884...
S1	P5	-0.86	0.51	1	40.503...
S1	P6	0.405	0.914	1	4.5640...
S1	P7	-0.031	1	1	28.439...
S1	P8	-0.5	0.866	1	47.806...
S1	P9	0.707	0.707	1	-0.050...
S1	P10	0.707	0.707	1	13.901...
S1	P11	1	0	1	-20.2
S1	P12	0.904	-0.427	1	-30.37...
S1	P13	0.599	-0.801	1	-35.04...
S1	P14	0	-1	1	-26.5
S1	P15	0	-1	1	-4.222



MP Matrice de pilotage

	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15
TX	-0.3235...	-0.1965...	-0.2361...	-0.0824...	0.0260...	-0.0276...	0.0667...	0.1508...	0.0761...	0.2330...	0.1204...	0.0733...	0.0018...	-0.0662...	0.1843...
TY	0.1717...	0.0136...	0.3142...	0.0131...	-0.1463...	0.2459...	0.0555...	-0.1670...	0.1419...	-0.0532...	0.0232...	-0.0116...	-0.0492...	-0.1200...	-0.4318...
Form	0.0766...	0.0742...	0.0524...	0.0564...	0.0564...	0.0485...	0.0437...	0.0450...	0.0525...	0.0495...	-0.0711...	0.0834...	0.0943...	0.1001...	0.0953...
Rot	-0.0096...	-0.0028...	-0.0098...	0.0010...	0.0073...	-0.0057...	0.0025...	0.0108...	-0.0021...	0.0062...	-0.0011...	-0.0023...	-0.0033...	-0.0021...	0.0112...

Pilotage



Type	Noms	Corr	S
trans	C1	-0.8167	✓
trans	C2	0.0203	✓
Forme	C3	-0.5242	✓
Rot	C4	-0.0137	✓

		Ecart	Après
1	1	0.05	0.201
2	1	0.1	0.1
3	1	0.05	0.05
4	1	0.2	0.2
5	1	0.3	0.3
6	1	0.8	0.8
7	1	0.8	0.8
8	1	0.8	0.8
9	1	1.2	1.2
10	1	1.4	1.4
11	1	1.2	1.2
12	1	0.8	0.8
13	1	0.5	0.5
14	1	0.1	0.1
15	1	0.4	0.4

Déréglage le plus probable

Pilotage Inertiel Total

Angers

Ordre de Fabrication : Ordre de Fabrication :

Opérateur : Opérateur :

surfaces	I	Id	L	S	N	X1	X2	X3	M	S	I	E	A	L	LSL	-IM	Cible	IM	USL	Type	Noms	Corr	S	LSL	-IM	Cible	IM	USL	surfaces	I
piece1	1	0.2	S1	P1	0				-0	0	0									trans	C1	0.0000	✓						S1	0.7287
	2	0.2	S1	P2	0.1				0.1	0	0.1									trans	C2	0.0000	✓						S1	Gain Inertie
	3	0.2	S1	P3	0.2				0.2	0	0.2									trans	C3	0.0000	✓						S1	0.0%
	4	0.2	S1	P4	0.3				0.3	0	0.3									trans	C4	0.0000	✓						S1	0.0%

Déréglage le plus probable, méthode Backward

Evolution du réglage en fonction des meilleures configurations de facteurs

Choix				
4	C4		X	X
3	C3	X		X
2	C2		X	X
1	C1	X	X	X

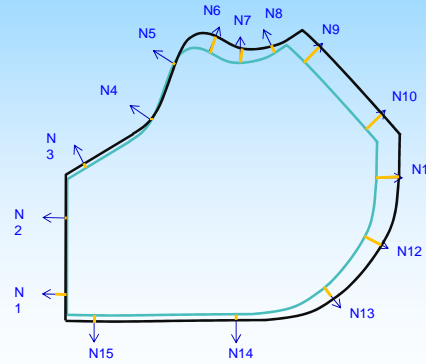
Equilibrage du poids des surfaces
Cpi maxi pour désarabilité 3

déréglage probable Backward / Forward

Saisie en Lignes / Modification dynamique

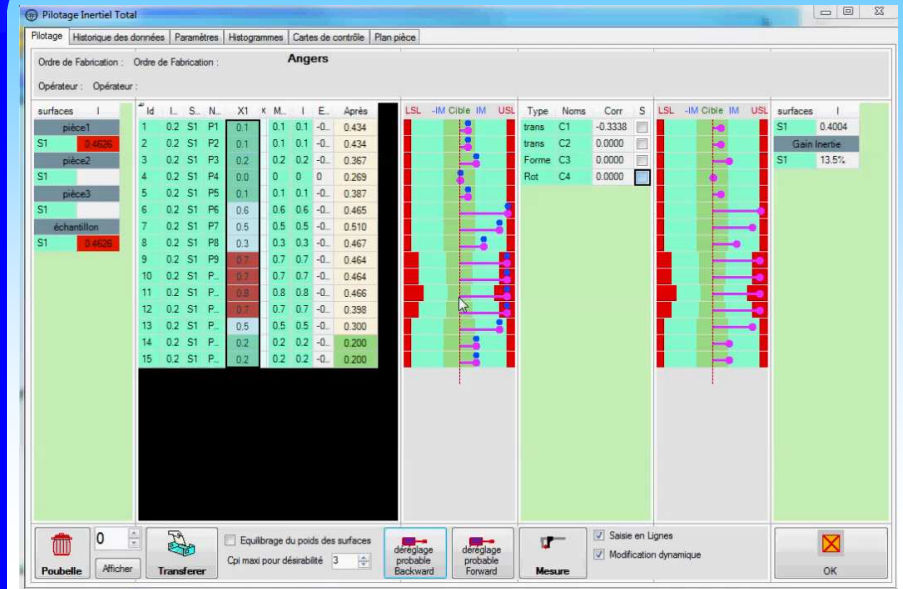
OK

Pilotage

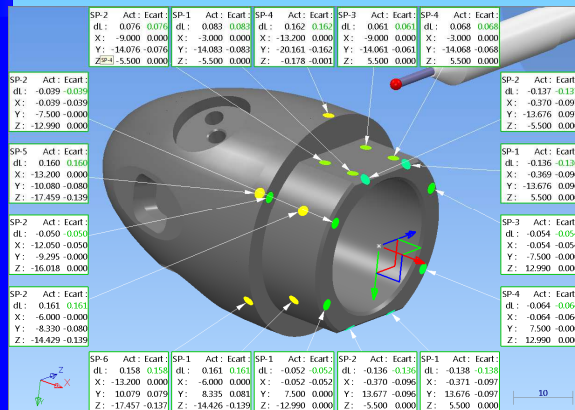


Réglage 2	
P1	0.1
P2	0.1
P3	0.2
P4	0.0
P5	0.1
P6	0.6
P7	0.5
P8	0.3
P9	0.7
P10	0.7
P11	0.8
P12	0.7
P13	0.5
P14	0.2
P15	0.2

Déréglage le plus probable



Pilotage 3D



Pilotage inertiel total = réduire l'inertie de l'écart entre les points réels et les points idéaux

Bibliographie

- PILLET, Maurice, BERNARD, Frédéric, AVRILLON, Laetitia, *et al.* Le tolérancement inertiel, une autre façon d'intégrer l'aspect combinatoire dans les processus assemblés. *CPI 2001*, 2001.
- PILLET, Maurice. *Améliorer la productivité: Déploiement industriel du tolérancement inertiel*. Editions Eyrolles, 2012.
- PAIREL, Éric, GOLDSCHMIDT, Ephraïm, VAYRE, Benjamin, *et al.* Copilot Pro®: A full method for the steering of the machining. *International Journal of Metrology and Quality Engineering*, 2011, vol. 2, no 01, p. 39-44.
- BOUKAR, A., PILLET, M., PAIREL, E., *et al.* Correction of machining operations with the Total Inertial Steering. *International Journal of Metrology and Quality Engineering*, 2014, vol. 5, no 01, p. 103.

Merci de votre attention

