

# *Quelles perspectives pour le tolérancement 3d en 2030 ?*

**ANF « MECA 2030 »**

1/10/2025

---

*Denis Teissandier*

# ***Quelles perspectives pour le tolérancement 3d en 2030 ?***



Quelques points de repère historiques

Verrous levés et Verrous à lever

Conclusions, perspectives au-delà 2030 ?

# Quelques points de repères historiques

Canons toujours  
exposés à Moscou.

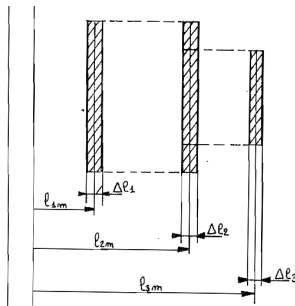
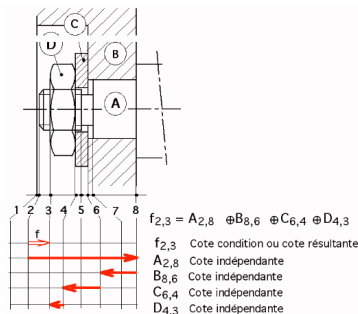


**1812 Campagne napoléonienne de Russie**  
*Problématique de l'interchangeabilité.*

**1926 Premier système unifié de tolérances et d'ajustements**  
**ISA** (International Federation of the National Standardizing Associations)

**1950** Première publication par l'ISO d'une norme sur les chaînes de cotes 1d

**1973 Bourdet, P.**, Chaînes de cotes de fabrication. L'Ingénieur et le Technicien de l'Enseignement Technique, 191.



$$L_1 = l_{sm} \pm \frac{\Delta l_1}{2}$$

$$L_2 = l_{sm} \pm \frac{\Delta l_2}{2}$$

$$L_3 = l_{sm} \pm \frac{\Delta l_3}{2}$$

1973 Bourdet P.

Documents en ligne sur le site du  
LURPA  
de l'ENS Paris Saclay.

# Quelques points de repères historiques

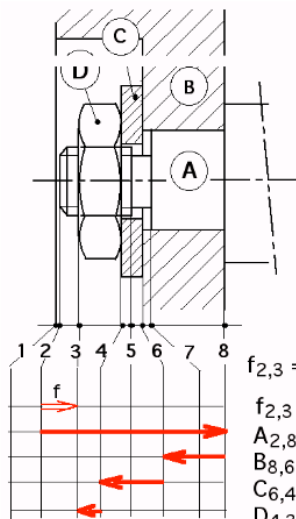
1970 ...

## Cotation « bureau d'études »

Condition Fonctionnelle CF :

$$d_{\min} \leq d \leq d_{\max}$$

CF est répartie sur des cotes « BE » de pièces constitutives.

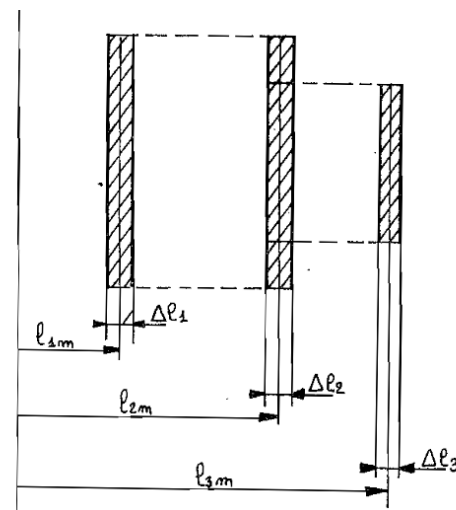


$$f_{2,3} = A_{2,8} \oplus B_{8,6} \oplus C_{6,4} \oplus D_{4,3}$$

- $f_{2,3}$  Cote condition ou cote résultante
- $A_{2,8}$  Cote indépendante
- $B_{8,6}$  Cote indépendante
- $C_{6,4}$  Cote indépendante
- $D_{4,3}$  Cote indépendante

## Cotation « bureau des méthodes » ou cotation de fabrication

Les cotes « BE » d'une pièce sont réparties dans des cotes de fabrication des différentes phases d'une gamme d'usinage.



$$L_1 = \ell_{1,m} \pm \frac{\Delta \ell_1}{2}$$

$$L_2 = \ell_{2,m} \pm \frac{\Delta \ell_2}{2}$$

$$L_3 = \ell_{3,m} \pm \frac{\Delta \ell_3}{2}$$

site du LURPA  
de l'ENS Paris Saclay.

## Quelques points de repères historiques

1970 ...

Cotation « bureau d'études »

Cotation « bureau des méthodes » ou  
cotation de fabrication

Un constat : ces méthodes de maîtrise de variations géométriques unidirectionnelles sont TRES utilisées en 2025 !

D'un point de vue métrologie, de nombreux instruments existent pour mesurer des dimensions.



Mesures  
d'écarts  
sur des  
profils de  
révolution.

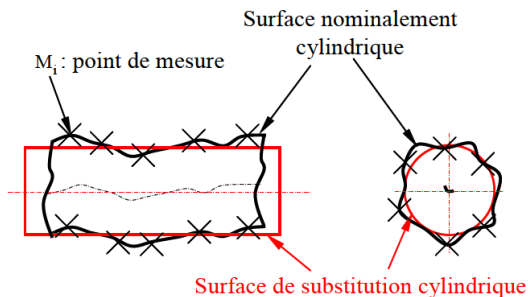
## Quelques points de repères historiques

**1969** Moteur Olympus 593 (Concorde)  
Rolls – Royce / Snecma.

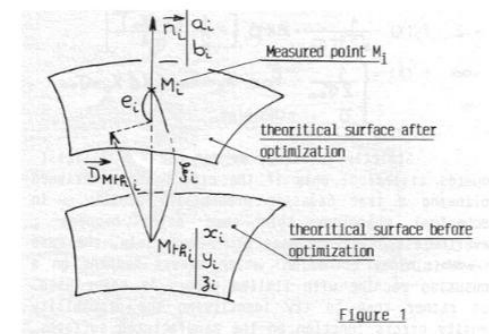
Premières mesures par coordonnées  
sur les profils des tuyères :  
début de la métrologie tridimensionnelle.



**1988** Clément, A. & Bourdet, P., Torseur de petits déplacements, *Annals of the CIRP*, 37(1).



$$\mathbf{e}_i = \xi_i - \left[ \vec{D_{Mhi}} \cdot \vec{n}_i \right]$$



Mesure de points de mesures,  
quantification des écarts de forme,  
d'orientation et de position.

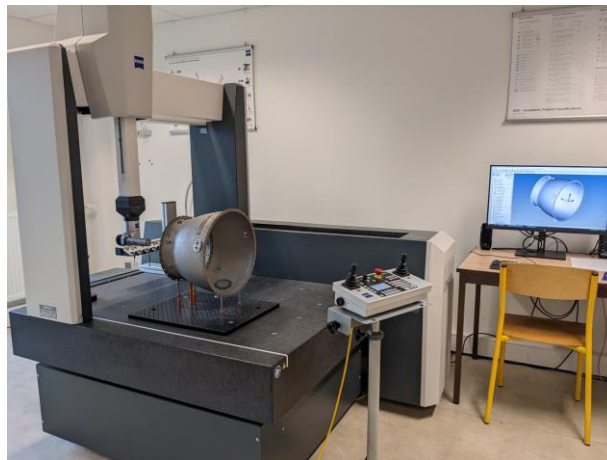
## Quelques points de repères historiques

**1969** Moteur Olympus 593 (Concorde)  
Rolls – Royce / Snecma.

*Premières mesures par coordonnées  
sur les profils des tuyères :  
début de la métrologie tridimensionnelle.*



**1980 ...**



**2000 ...**



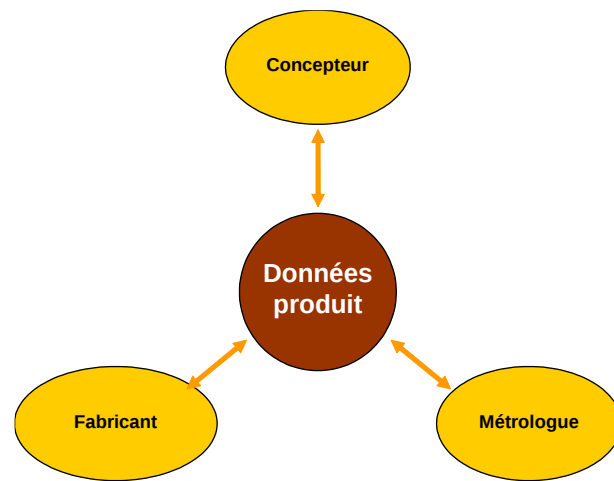
## Quelques points de repères historiques

1990 ...

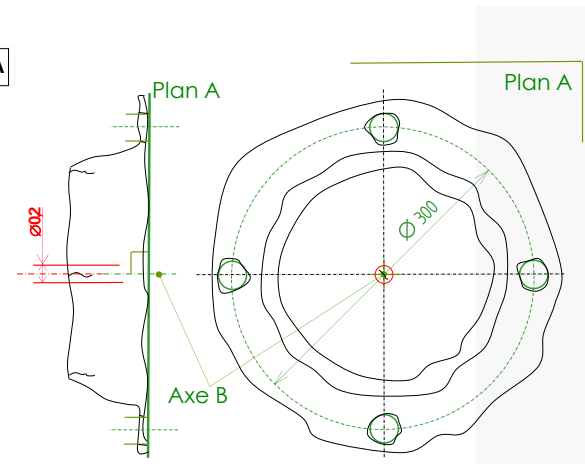
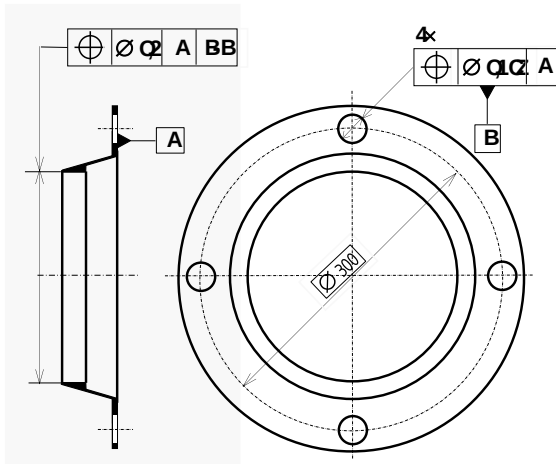


Dysfonctionnements dus:

- à une mauvaise connaissance du langage,
- à des lacunes et incohérences des normes.



Nécessité d'avoir un langage international et univoque.



## Quelques points de repères historiques

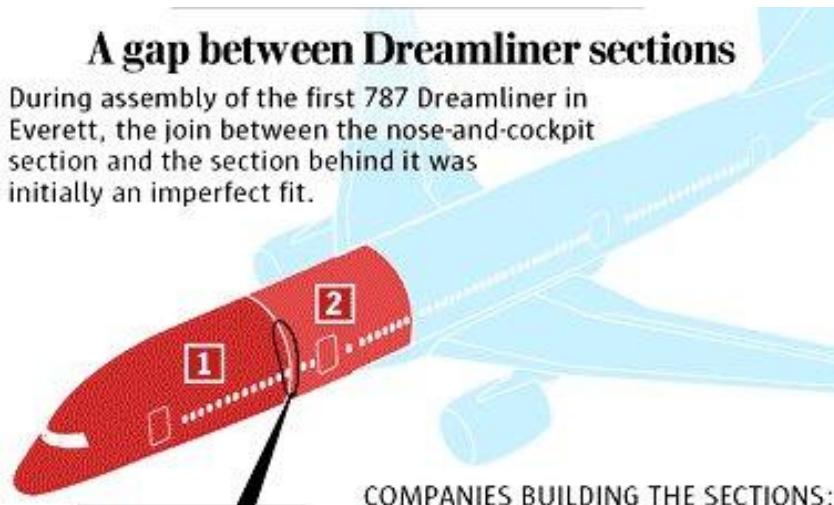
1990 ...2025 ... 2030...



*L'entreprise est une entreprise étendue.*

### A gap between Dreamliner sections

During assembly of the first 787 Dreamliner in Everett, the join between the nose-and-cockpit section and the section behind it was initially an imperfect fit.



A gap as large as 0.3 inch occurs in this area of the join.

COMPANIES BUILDING THE SECTIONS:

- 1** Spirit: Nose and cockpit section
- 2** Kawasaki: Fuselage section

# *Les verrous levés, les verrous à lever.*

**1989 1<sup>ère</sup> conférence CIRP on Computer Aided Tolerancing**



**19th CIRP Computer Aided Tolerancing**  
Edmonton, Alberta, Canada, June 15–17, 2026.

**1991** première version de MECAmaster

**1992** MECAmaster - application d'Euclid IS.

**1993...** : tolérancement 3d, chaînes de cotes 3d, métrologie 3d

**2010** : Jumeaux numériques

**2011** : Industrie 4.0, Smart Machining

*Quel modèle géométrique : vers une simulation de plus en plus réaliste des contacts.*

*Loi de comportement géométrique : prise en compte des architectures isostatiques ou hyperstatiques ?*

*Loi de comportement mécanique*

*Analyse de tolérances, synthèse de tolérances, allocation de tolérances*

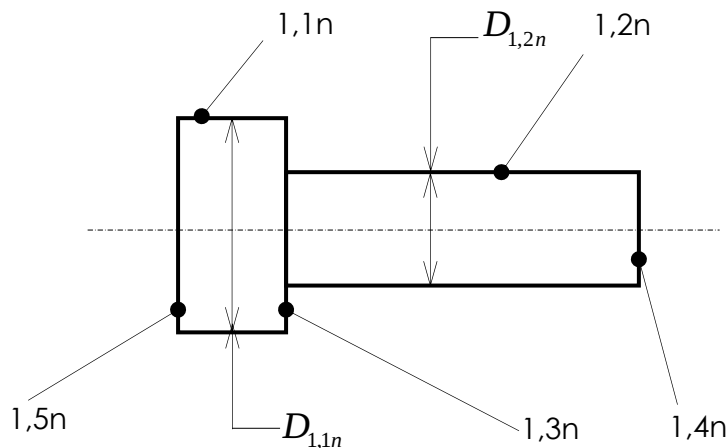
## Les verrous levés, les verrous à lever.

### Hypothèses physiques émises en tolérancement 3d :

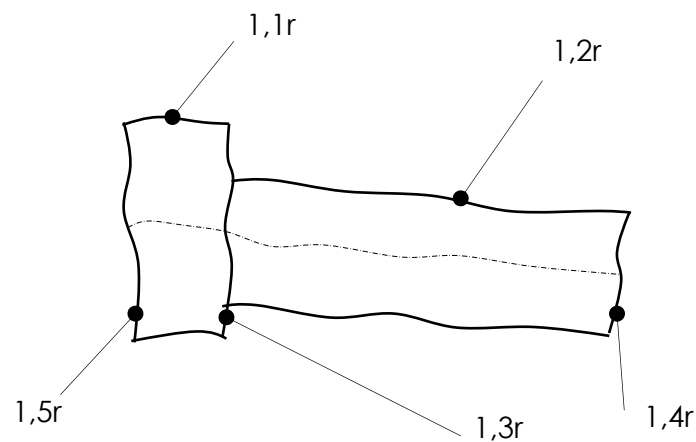
- pas de défaut de forme des surfaces,
- pas de déformation locale entre des surface en contact,
- pas de déformation des pièces (solides rigides).

### Modèles pour la simulation des écarts géométriques

- Modèle nominal et “skin” modèle



1,j,n : surface nominale j de la pièce 1



1,j,r : surface réelle j de la pièce 1

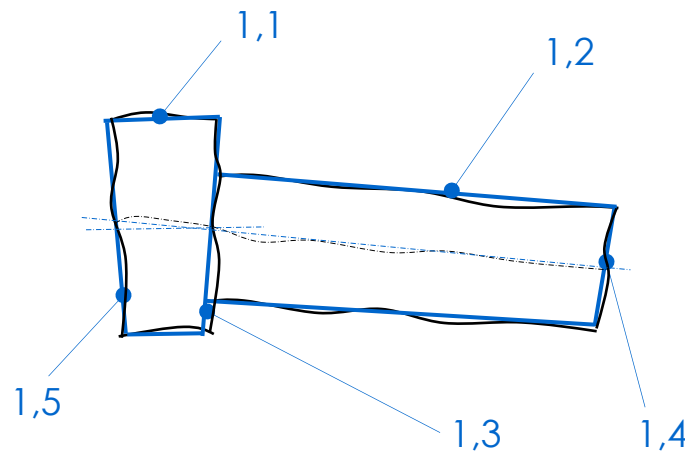
## Les verrous levés, les verrous à lever.

### Surface de substitution :

Surface idéale de même type que la surface nominale dont elle caractérise une réalisation physique particulière.

### Exemple :

Une surface nominalement cylindrique est modélisée par une surface de substitution cylindrique.



1,j : surface de substitution j de la pièce 1

# Les verrous levés, les verrous à lever.

## Ecarts géométriques d'une pièce

- Ecarts de situation
- Ecarts de dimension

### Ecarts de situation :

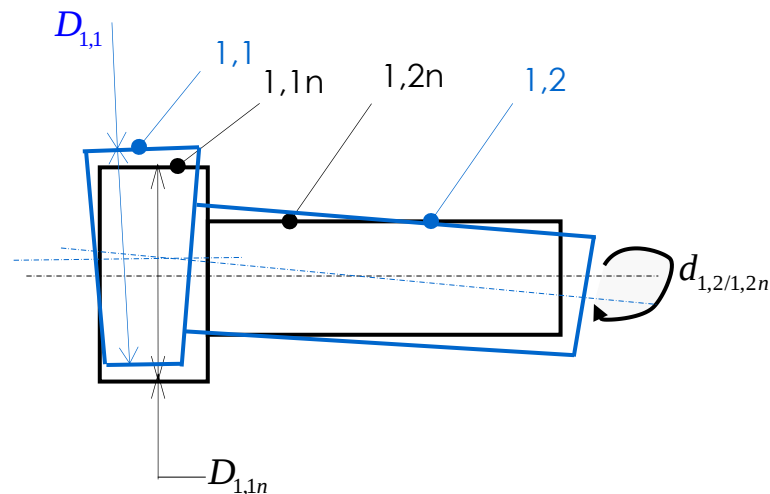
Définissent la position des éléments de situation d'une surface de substitution par rapport aux éléments de situation de la surface nominale correspondante utilisée comme référence.

Exemple :  $d_{1,2/1,2n}$

### Ecart de dimension :

différence entre le diamètre d'une surface de substitution  $D_{1,1}$ , et le diamètre d'une surface nominale  $D_{1,1n}$

Exemple :  $d_{1,1} = D_{1,1} - D_{1,1n}$



## Les verrous levés, les verrous à lever.

Quel modèle mathématique pour la simulation des écarts de situation ?

— Linéarisation des déplacements en petits déplacements

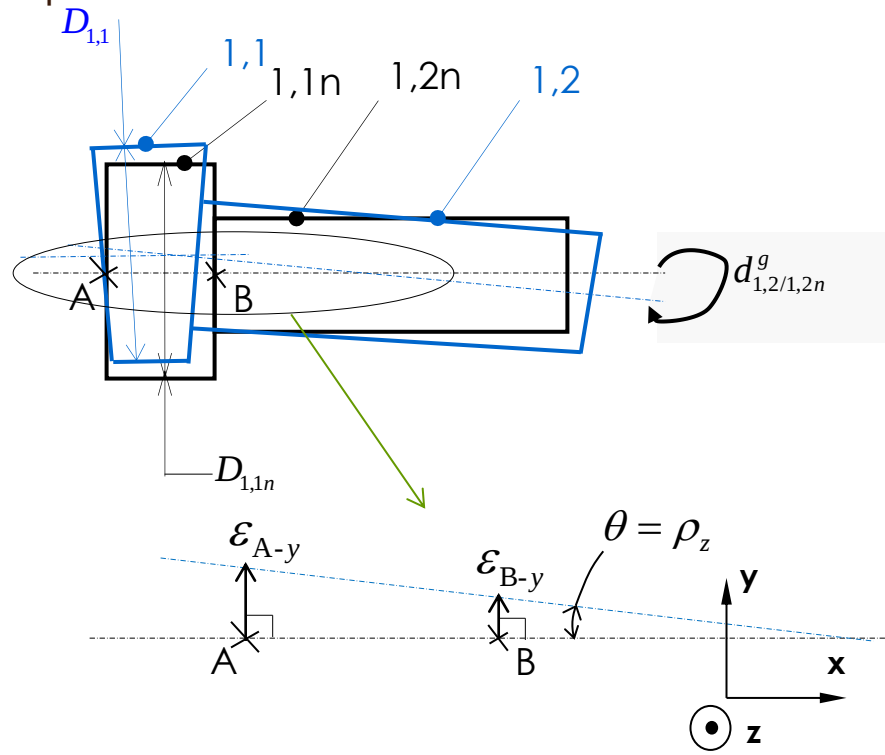
$$\begin{bmatrix} d_{1,2/1,2n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_{1,2/1,2n} \\ \mathbf{t}_{B-1,2/1,2n} \end{bmatrix}_B$$

$$\begin{bmatrix} d_{1,2/1,2n} \end{bmatrix} \quad \text{torseur de petits déplacements}$$

$\mathbf{r}_{1,2/1,2n}$  vecteur rotation

$\mathbf{t}_{B-1,2/1,2n}$  vecteur translation exprimé au point B

$$\mathbf{r}_{1,2/1,2n} \begin{bmatrix} \rho_x \\ \rho_y \\ \rho_z \end{bmatrix} \quad \mathbf{t}_{B-1,2/1,2n} \begin{bmatrix} \varepsilon_{B-x} \\ \varepsilon_{B-y} \\ \varepsilon_{B-z} \end{bmatrix} \quad \text{dans } (x, y, z)$$



## Les verrous levés, les verrous à lever

Quel modèle mathématique pour la simulation des écarts de situation ?

— Linéarisation des déplacements en petits déplacements

$$\begin{bmatrix} d_{1,2/1,2n} \end{bmatrix} = {}_B \begin{bmatrix} \mathbf{r}_{1,2/1,2n} \\ \mathbf{t}_{B-1,2/1,2n} \end{bmatrix}$$

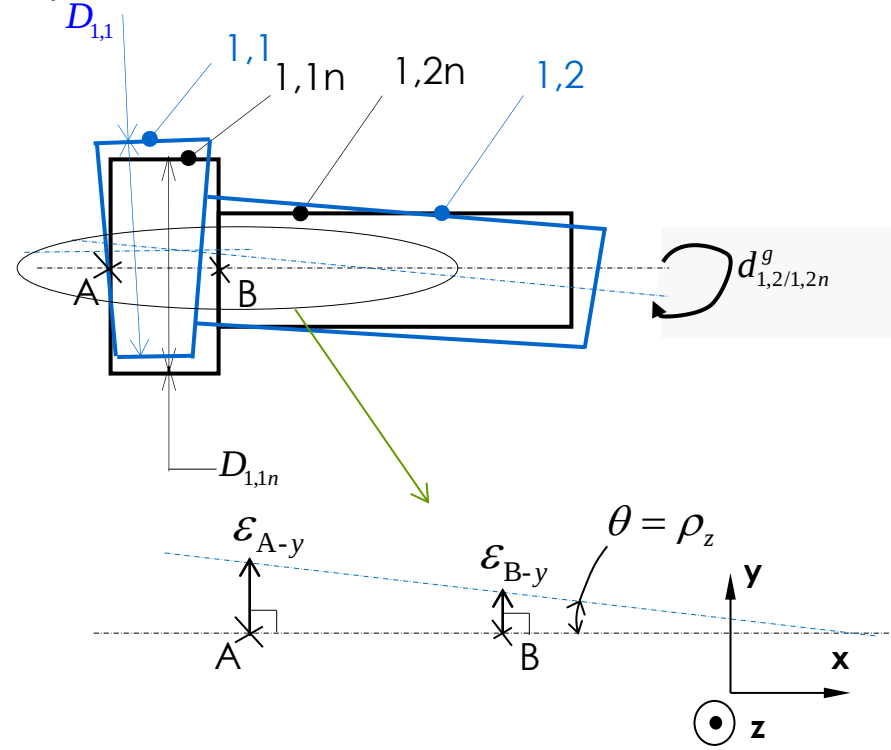
$$\begin{bmatrix} d_{1,2/1,2n} \end{bmatrix} \text{ torseur de petits déplacements}$$

$$\varepsilon_{A-y} = \varepsilon_{B-y} + AB.\theta \text{ avec } \tan(\theta) = \theta$$

Produit vectoriel

Champ de petits déplacements

$$\mathbf{t}_{A-1,2/1,2n} = \mathbf{t}_{B-1,2/1,2n} + \mathbf{AB} \times \mathbf{r}_{1,2/1,2n}$$

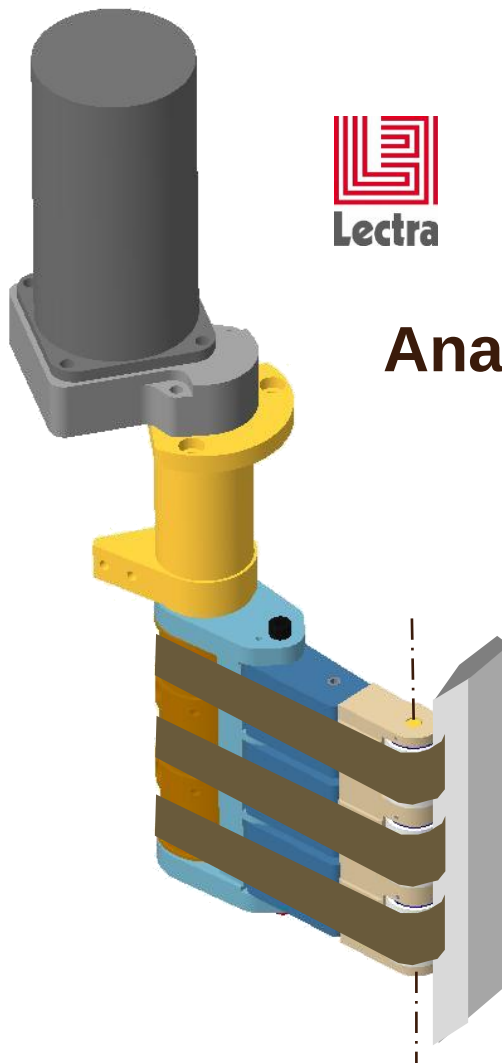


# Exemple



Système d'affutage d'une  
machine de découpe

## Analyse de tolérances 3d

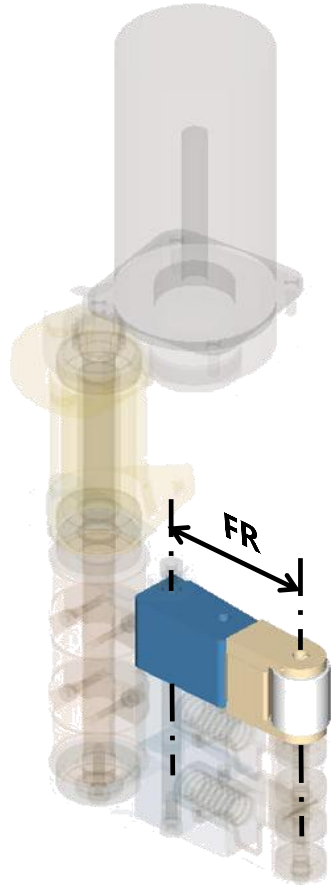


# Exemple



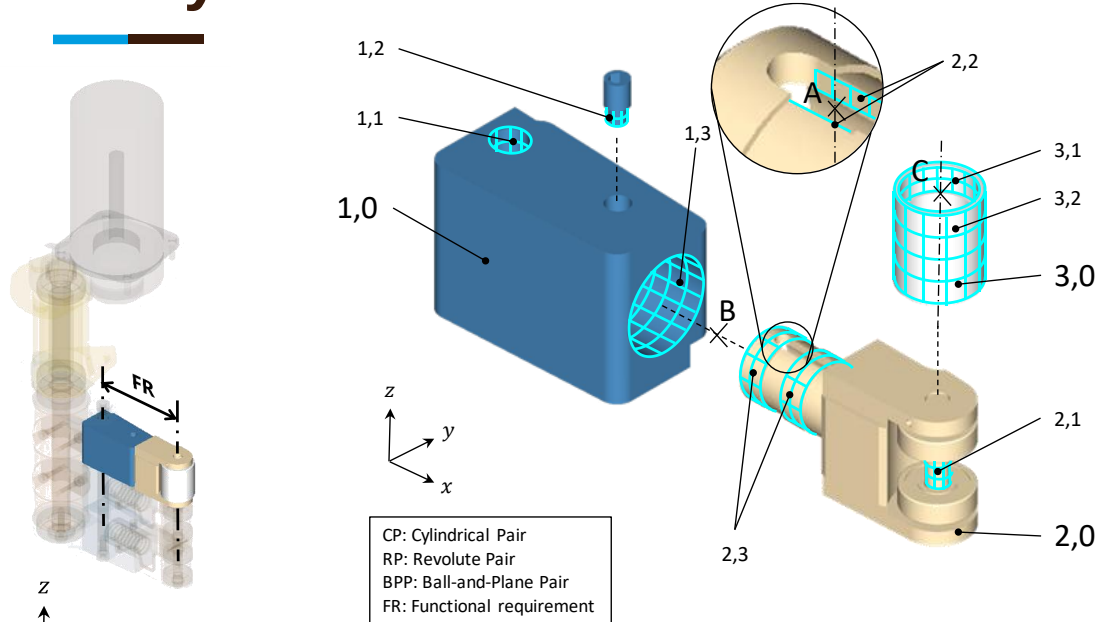
Système d'affutage d'une  
machine de découpe

## Analyse de tolérances 3d

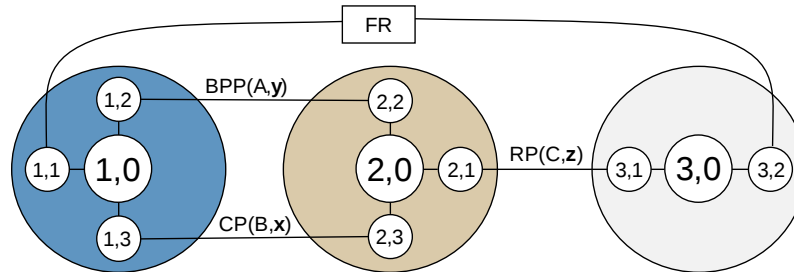


Condition Fonctionnelle

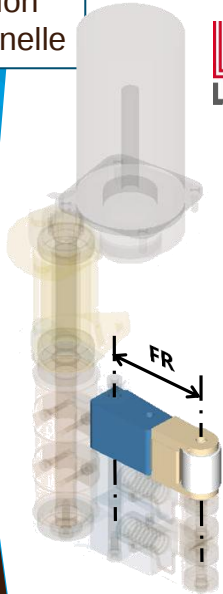
# Analyse de tolérances 3d



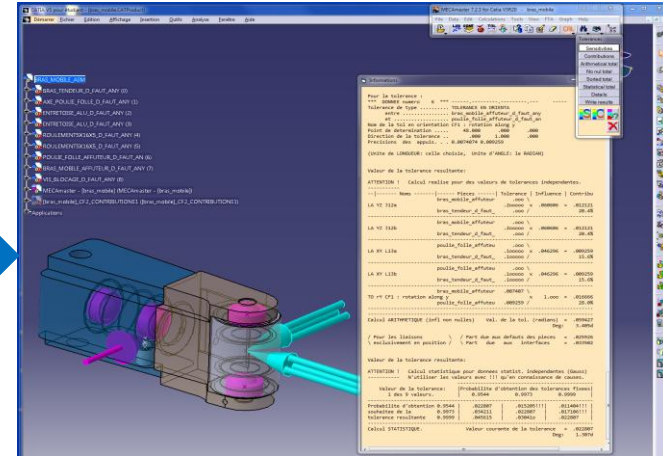
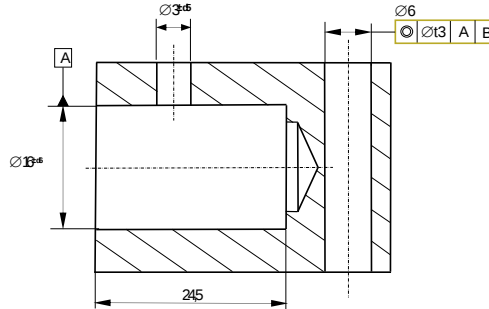
Pièces, sous-ensembles, liaisons



Graphe



3D model showing a blue rectangular block on the left and a yellow L-shaped block on the right. A dashed line indicates the point of contact between the blue block's side and the yellow block's vertical face. The word "Contact" is written below the dashed line.

**MECAmaster**

Pas de défaut de forme des surfaces,  
Pas de déformation locale dans les contacts,  
Pas de déformation des pièces (solides rigides).

## Architectures isostatiques.

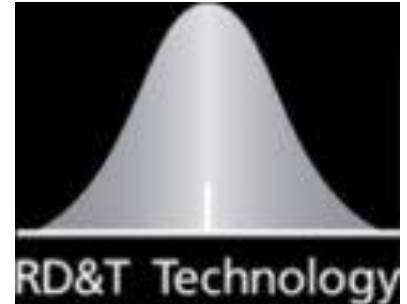
# Analyse de tolérances 3d en 2025

**MECAmaster**

**anatole 3D**

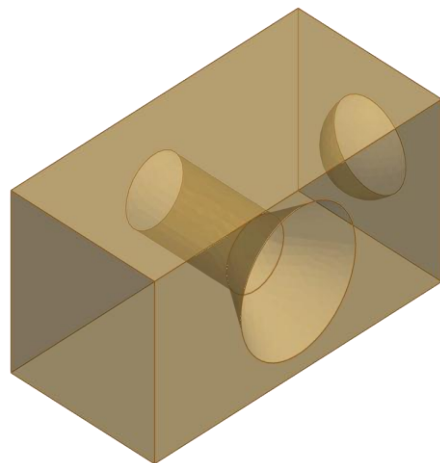


**SIEMENS** (VSA)

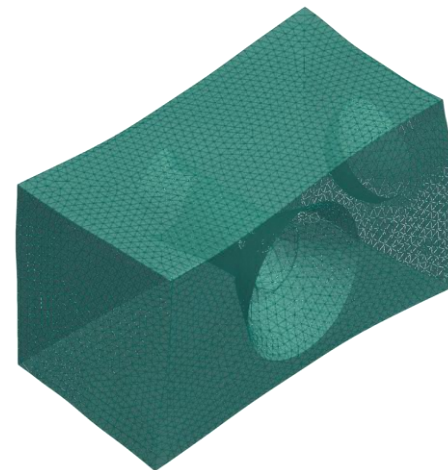
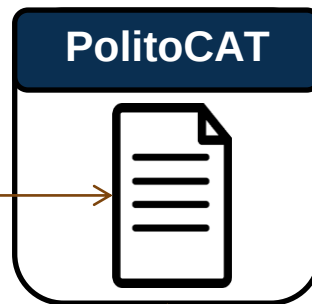


**CETOL 6σ**

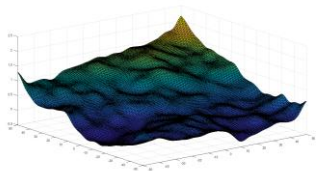
# Prise en compte des défauts de forme



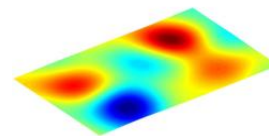
**Systematic**



**Random Deviations**

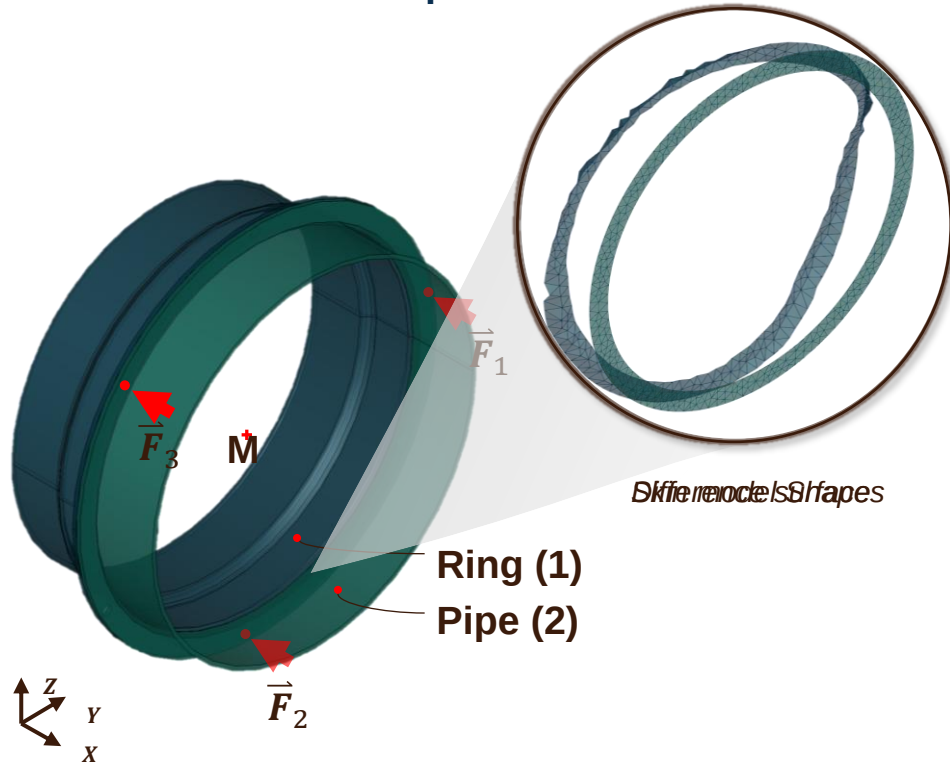


**Modal  
Decomposition:  
vibration modes**



*Gaussian Random Fields  
1-D Gaussian*

## Geometric space



## Objective

- Applied the enriched definition of prismatic polyhedron in a contact between non-ideal feature

$$\Gamma = P \oplus \sum_i \Delta_i$$

$$P = \text{Min}[(\cap \bar{H}_i^+) \cap \bar{H}_F^+]_{vol}$$

## Deviation modeling

### Systematic

Modal-decomposition

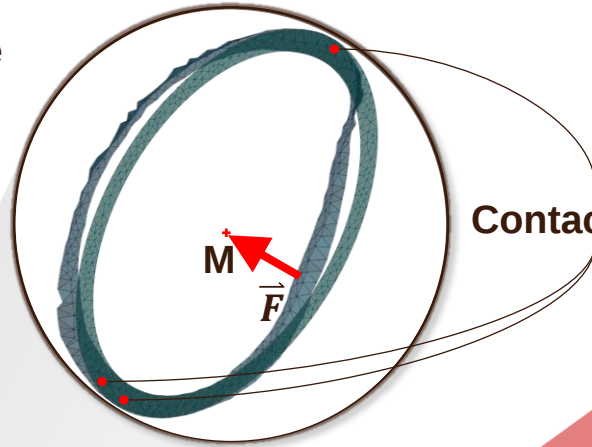
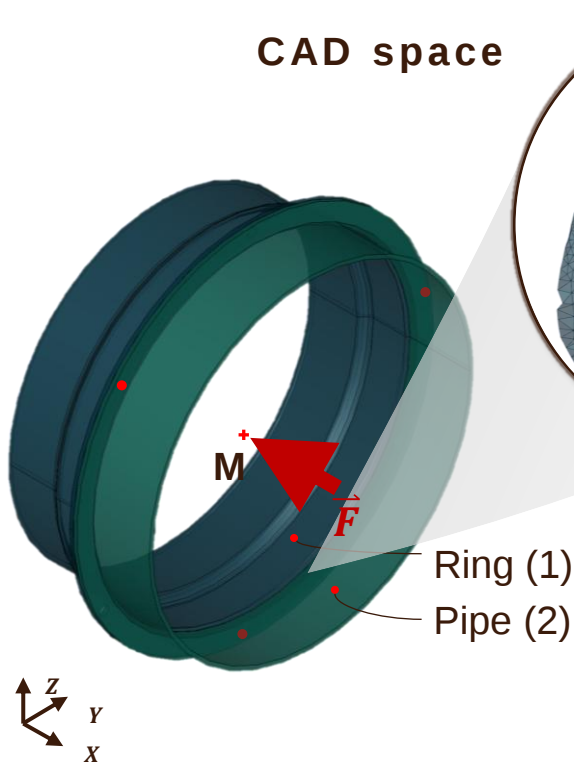
### Random

Gaussian random fields

# Case study: ring

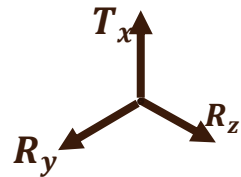
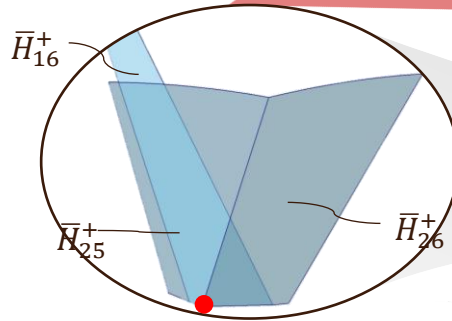
Restrepo Garcia, C. A., Teissandier, D., Anwer, N., Ledoux, Y., Delos, V., Pierre, L., & Garcia Gomez, S. C. (2023). an Approach for the Inclusion of Loading Conditions in a Polyhedral-Based Method for Early Variation Management. Proceedings of the Design Society, 3(JULY), 515–524.  
<https://doi.org/10.1017/pds.2023.52>

## CAD space



## Deviation space

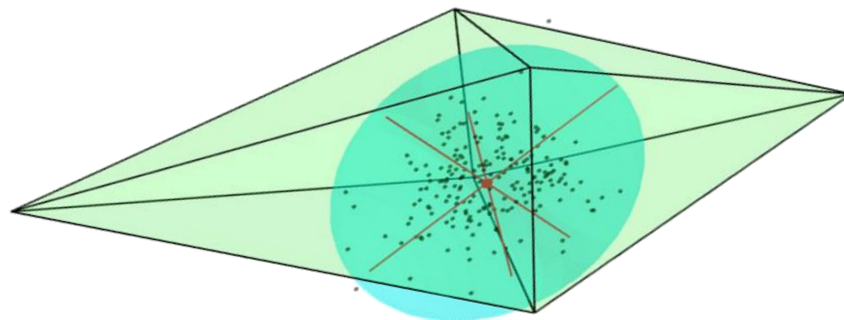
$$\Gamma = P \oplus \sum_i \Delta_i \quad P = \text{Min} \left[ \left( \cap_i \bar{H}_i^+ \right) \cap \bar{H}_F^+ \right]_{vol}$$



**Jumeau  
numérique  
Industrie 4,0  
Tolérancement  
de fabrication**

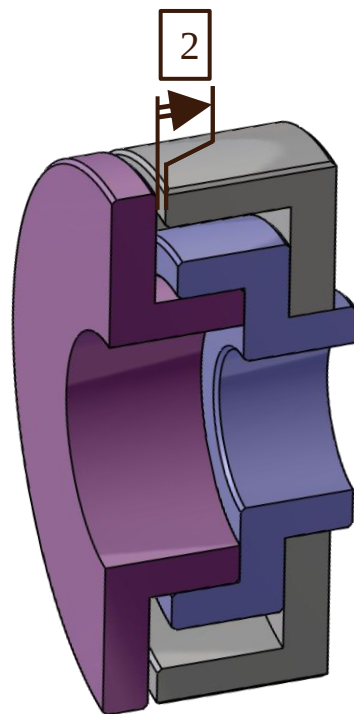
---

# Conception et Fabrication Paramétrées



Alexandre PRÉVOT

## 0.1 – Conception et Fabrication « Classiques »

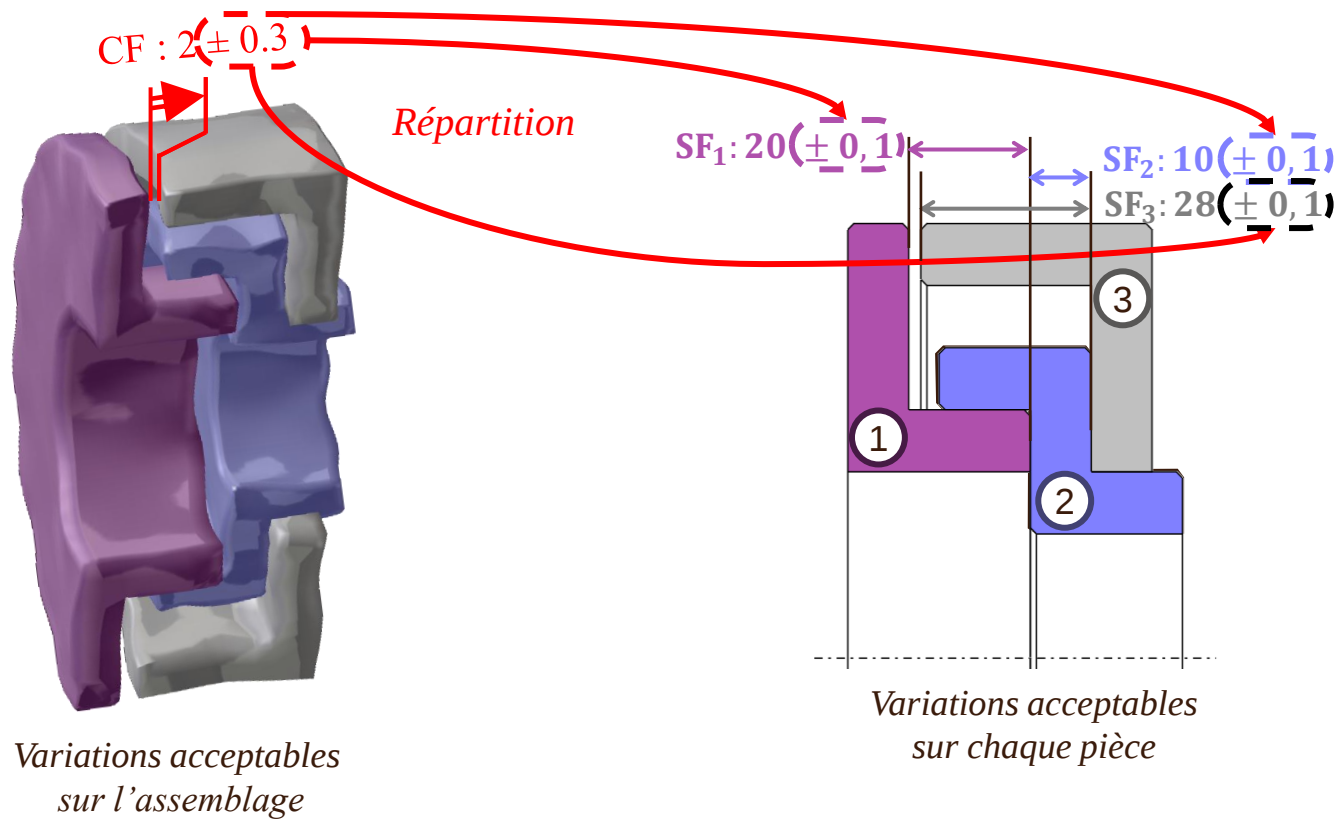


*Géométrie nominale : idéale*

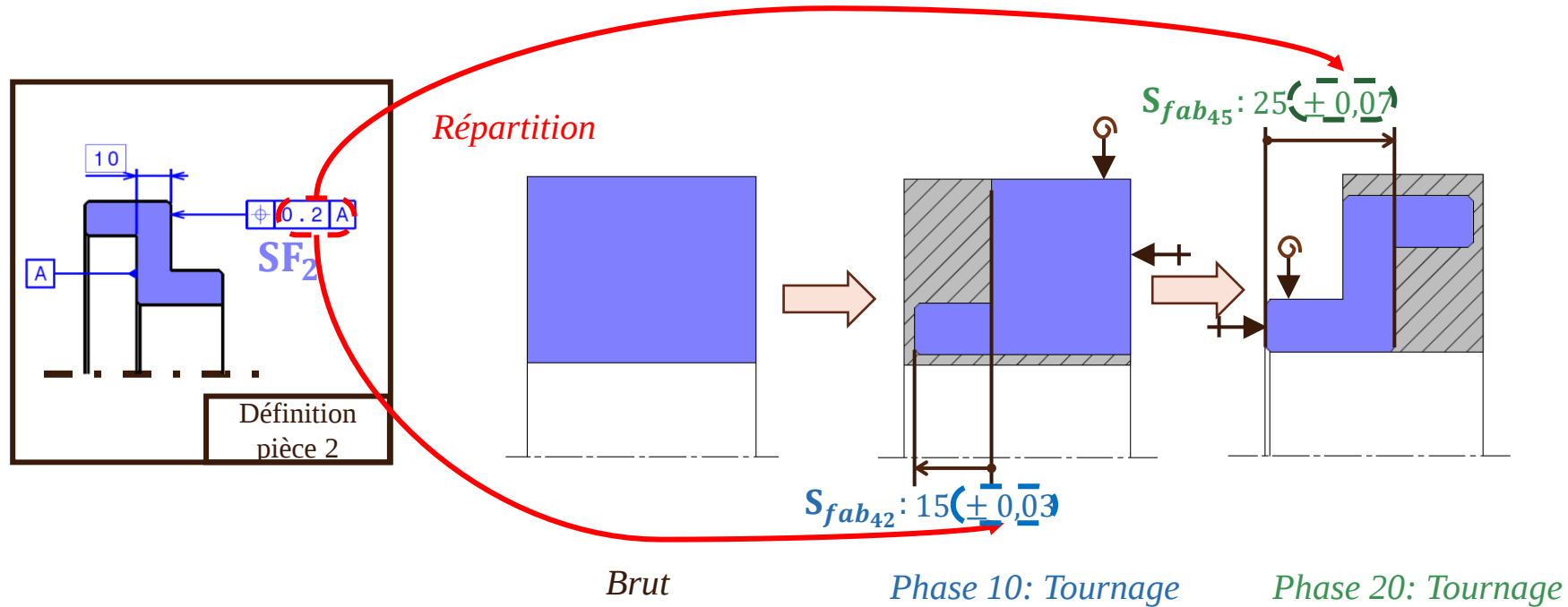


*Produit réel : écarts **inévitables***

## 0.1 – Conception et Fabrication « Classiques »

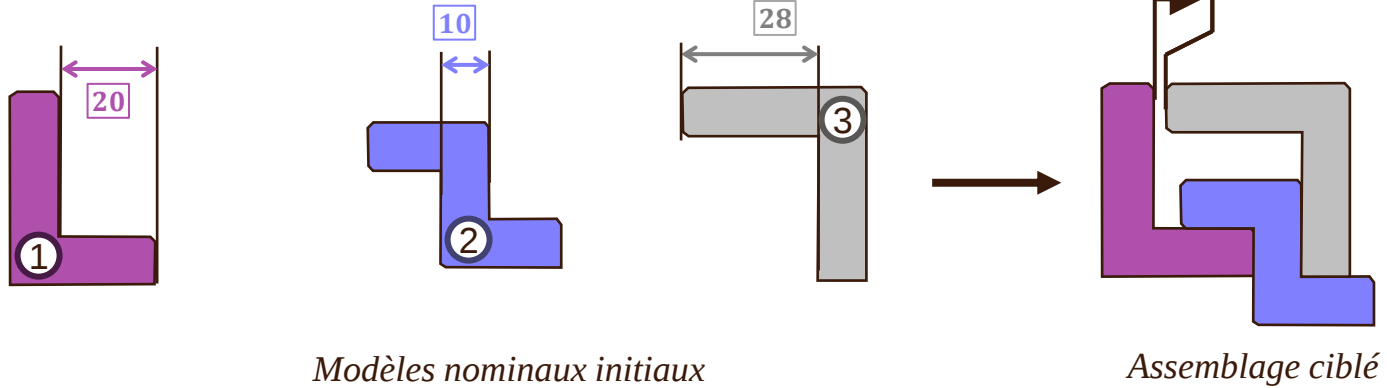


## 0.1 – Conception et Fabrication « Classiques »



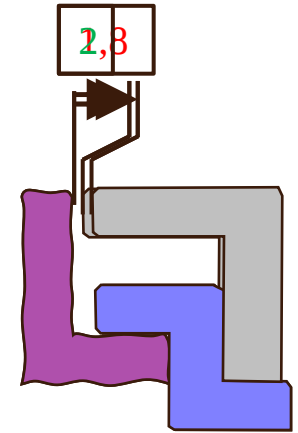
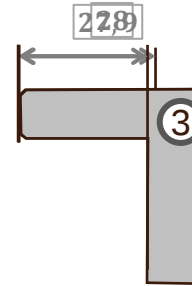
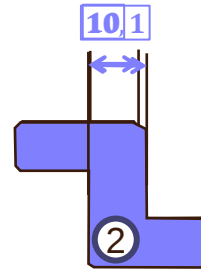
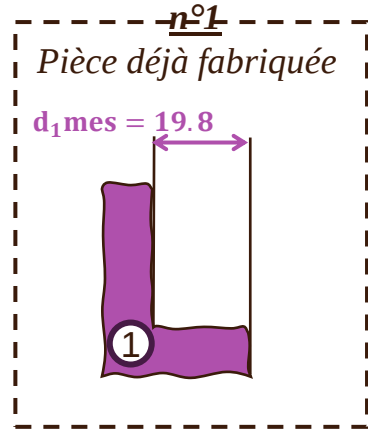
### Conception Paramétrée

Avant fabrication



### Conception Paramétrée

Après fabrication de la pièce

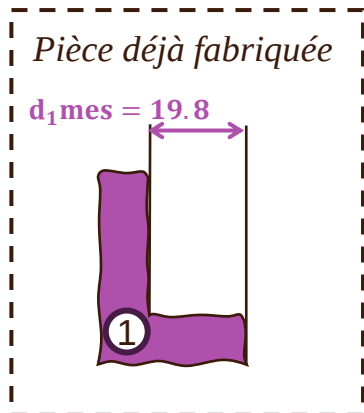


**Modèles nominaux initiaux**  
*Ajustements des dimensions nominales*

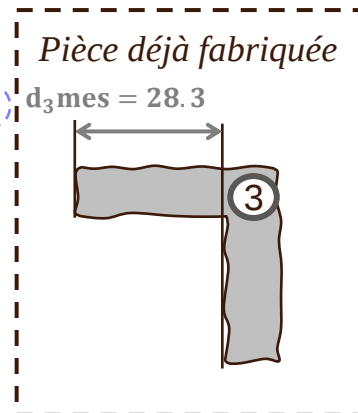
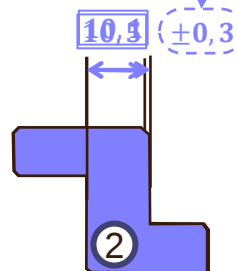
*Assemblage ciblé*

### Conception Paramétrée

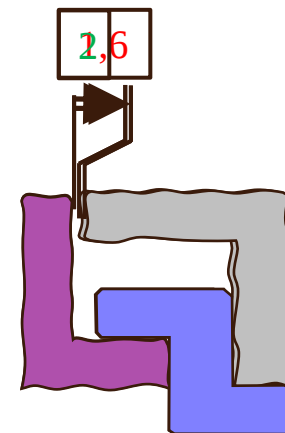
Après fabrication des pièce n°1 et n°3



Nouveau modèle  
nominal ciblé



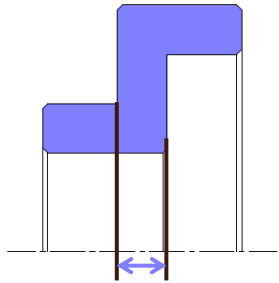
Réallocation de la  
tolérance de la CF



Assemblage ciblé

### Fabrication Paramétrée

*Définition ajustée*

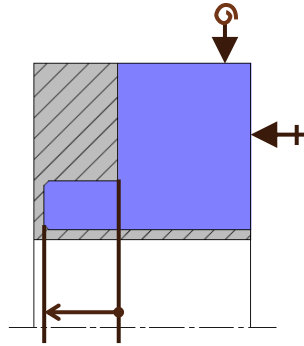


Spécif. Fonctionnelle

Nominal : 10,5

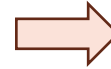
Tolérance :  $\pm 0,3$

*Phase 10: Tournage*

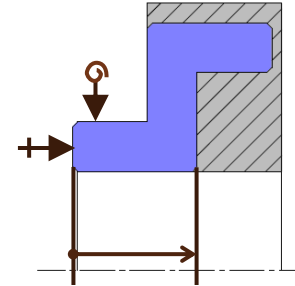


Cible initiale : 15

Tolérance:  $\pm 0,03$



*Phase 20: Tournage*

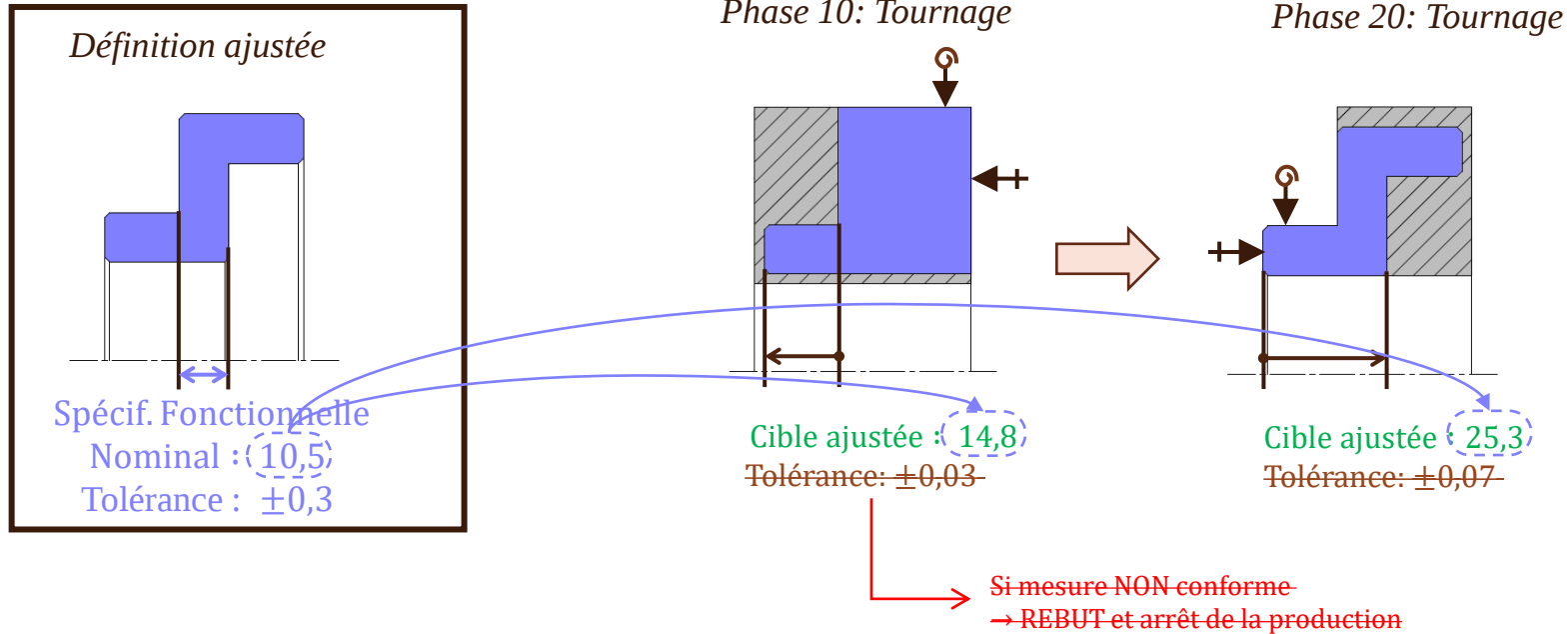


Cible initiale : 25

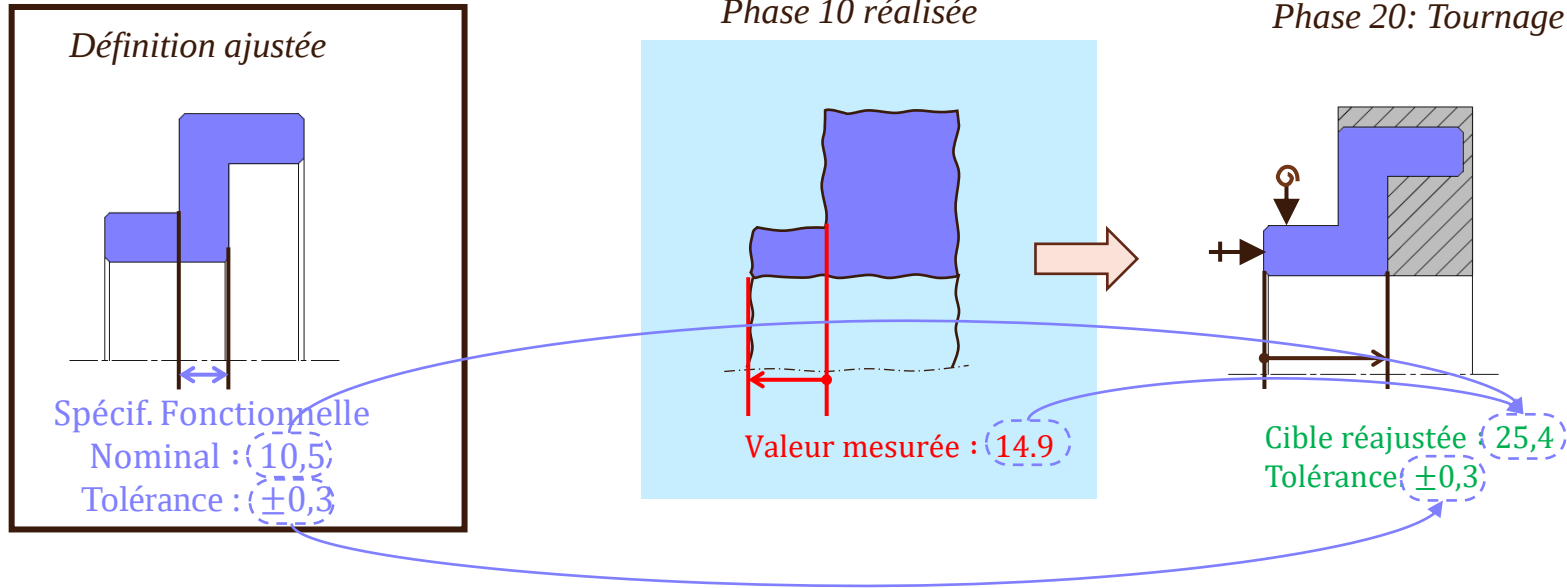
Tolérance:  $\pm 0,07$

Si mesure NON conforme  
→ REBUT et arrêt de la production

### Fabrication Paramétrée



### Fabrication Paramétrée



## 0.3 – Contexte industriel et verrous scientifiques

### Production à Safran Helicopter Engines

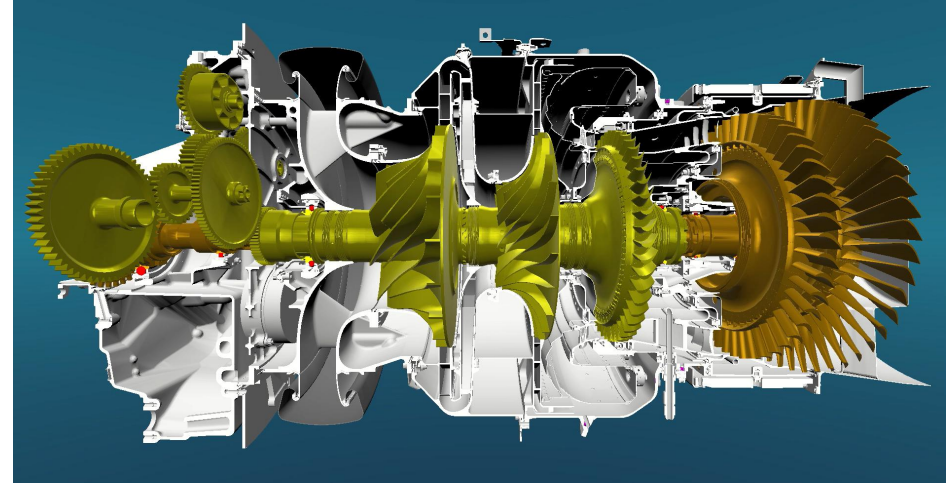
- Sous-ensembles à très **haute valeur ajoutée**
- Production de faible volume
- Performances élevées

Nombreuses CF + Tolérances serrées

Réparties sur les SF de **nombreux composants**

Fabriqués en **nombreuses phases**

**Haut risque de non-conformités**



*Turbomoteur - ARDIDEN 3*

## 0.3 – Contexte industriel et verrous scientifiques

### Production à Safran Helicopter Engines

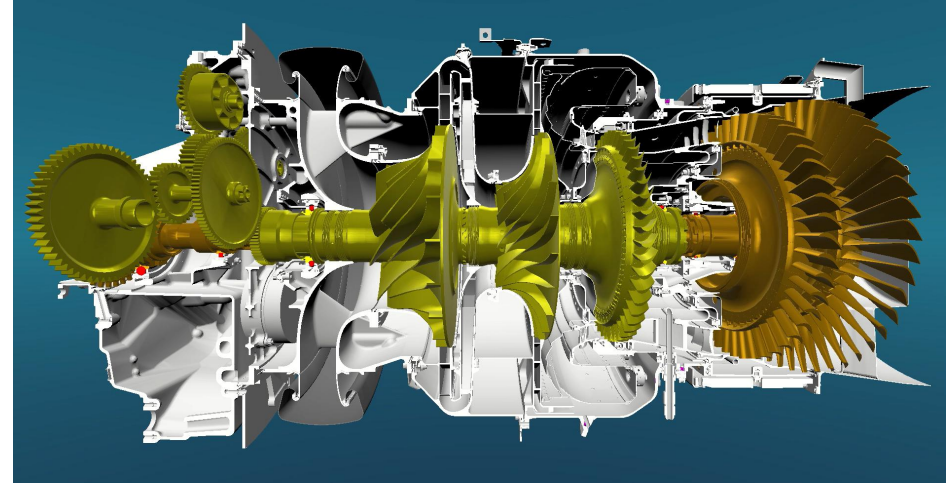
- Sous-ensembles à très **haute valeur ajoutée**
- Production de faible volume
- Performances élevées

Nombreuses CF + Tolérances serrées

Réparties sur les SF de **nombreux composants**

Fabriqués en **nombreuses phases**

**Haut risque de non-conformités**



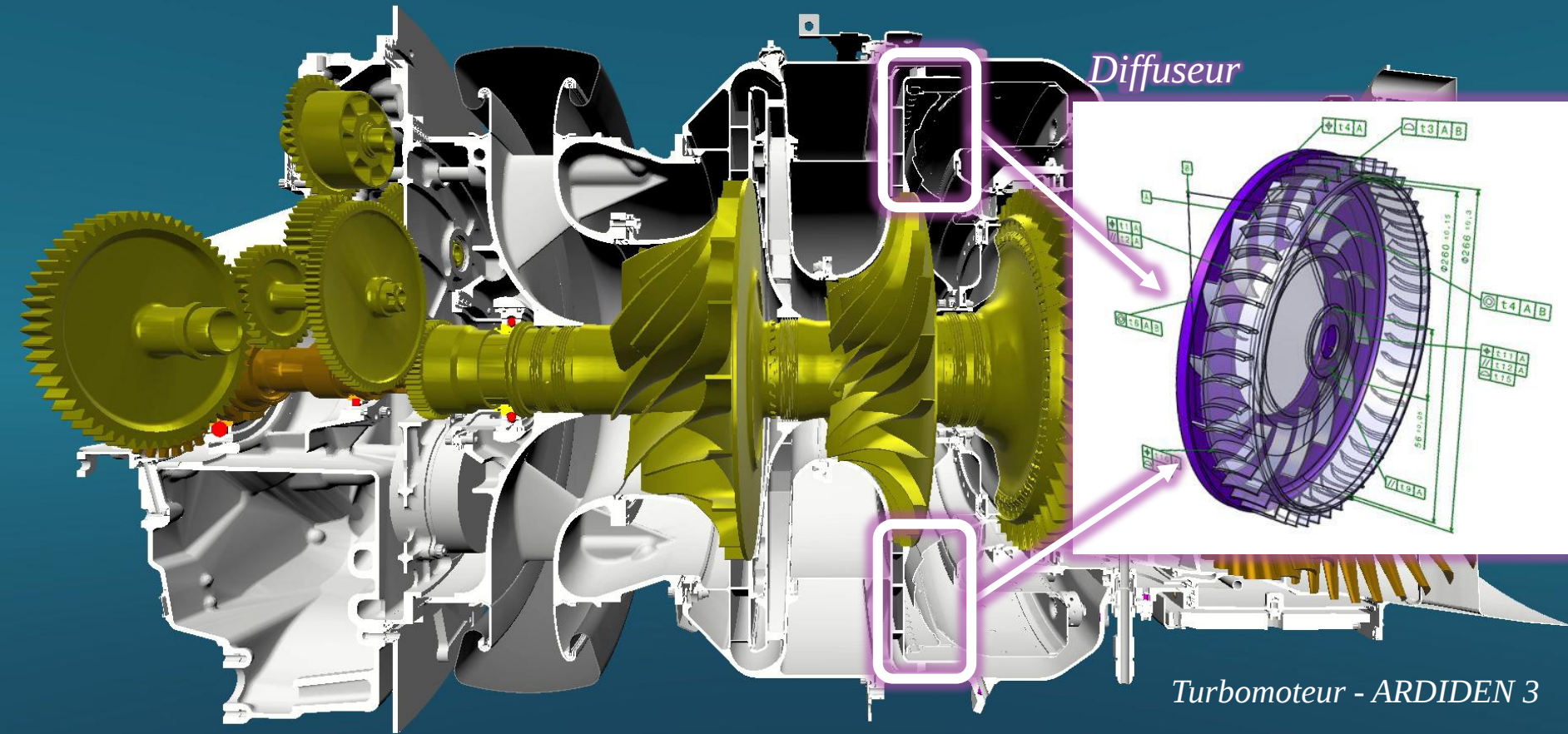
*Turbomoteur - ARDIDEN 3*

La CFP \* est un levier pour :

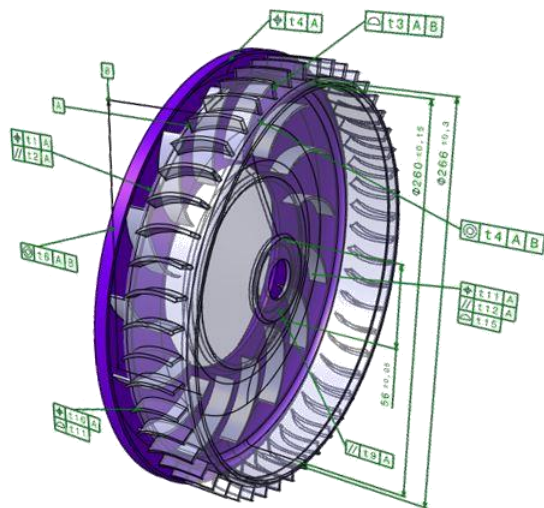
- ↘ **composants non-conformes** : réduction des coûts
- ↗ **les performances** : compétitivité

(\*) Conception et Fabrication Paramétrées

## 0.3 – Contexte industriel et verrous scientifiques

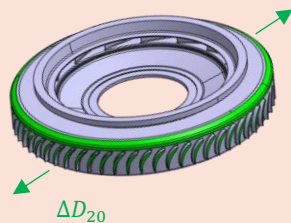


## 0.3 – Contexte industriel et verrous scientifiques

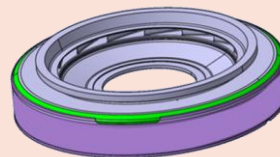


### Gamme de fabrication

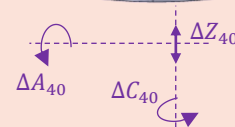
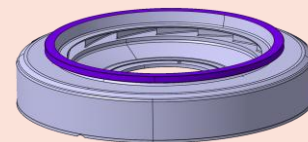
Phase 20



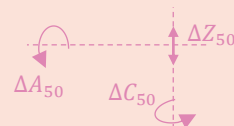
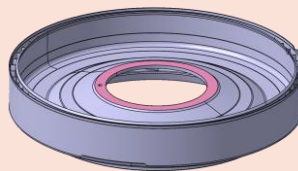
Phase 30



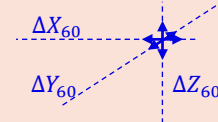
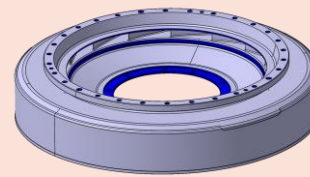
Phase 40



Phase 50



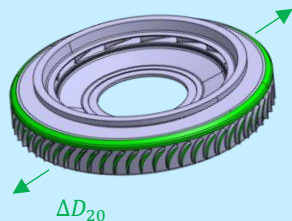
Phase 60



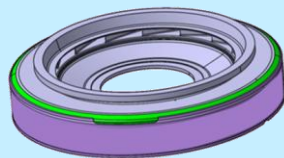
## 0.3 – Contexte industriel et verrous scientifiques

*Phases déjà réalisées*

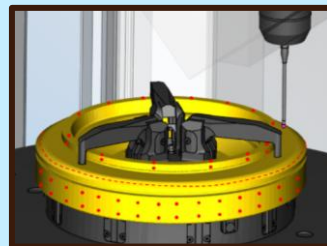
Phase 20



Phase 30



Mesures intermédiaires



Ombre numérique  
avant Phase 40



Jumeau numérique avant Phase 40

Surfaces mesurées avant OP180

Cible OP180

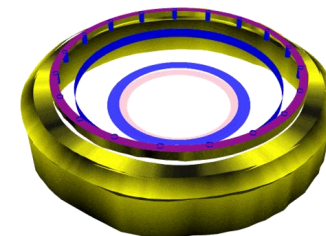
Cible OP184

Cible OP188

$\Delta Z180 = 0.0\text{mm}$ ,  $\Delta A180 = 0.0^\circ$ ,  $\Delta C180 = 0^\circ$

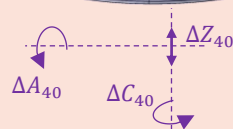
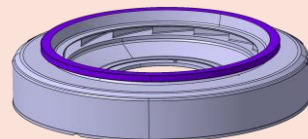
$\Delta Z184 = 0.0\text{mm}$ ,  $\Delta A184 = 0.0^\circ$ ,  $\Delta C184 = 0^\circ$

$\Delta X188 = 0.0\text{mm}$ ,  $\Delta Y188 = 0.0^\circ$ ,  $\Delta Z188 = 0.0^\circ$

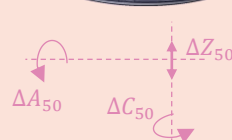
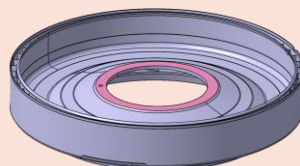


*Futures phases*

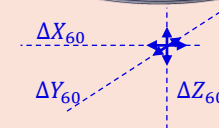
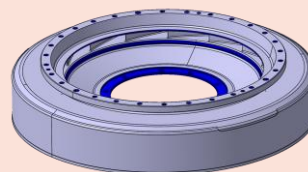
Phase 40



Phase 50

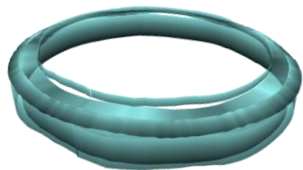


Phase 60



## 0.3 – Contexte industriel et verrous scientifiques

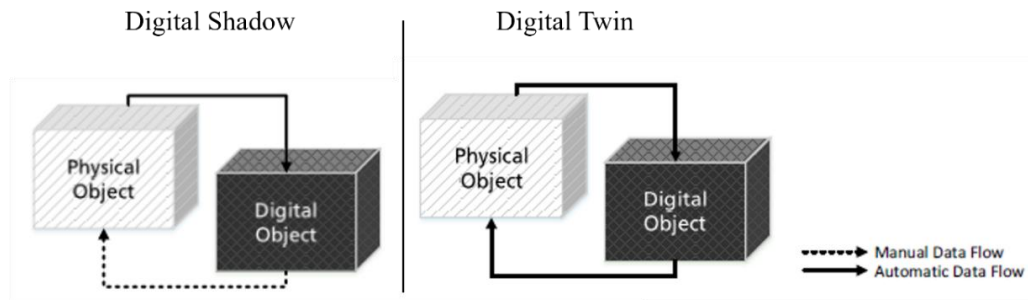
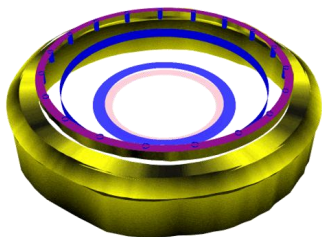
Ombre numérique  
avant Phase 40



Jumeau numérique avant Phase 40

Surfaces mesurées avant OP180

- Cible OP180  $\Delta Z180 = 0.0\text{mm}$ ,  $\Delta A180 = 0.0^\circ$ ,  $\Delta C180 = 0^\circ$
- Cible OP184  $\Delta Z184 = 0.0\text{mm}$ ,  $\Delta A184 = 0.0^\circ$ ,  $\Delta C184 = 0^\circ$
- Cible OP188  $\Delta X188 = 0.0\text{mm}$ ,  $\Delta Y188 = 0.0^\circ$ ,  $\Delta Z188 = 0.0^\circ$



Kritzinger et al. 2018 [1]

## 0.3 – Contexte industriel et verrous scientifiques

■ Surfaces mesurées avant OP180

■ Cible OP180

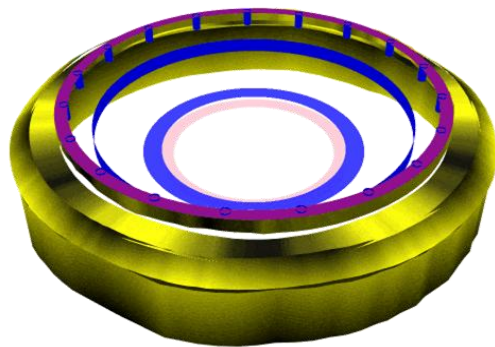
■ Cible OP184

■ Cible OP188

$\Delta Z180 = 0.0\text{mm}$ ,  $\Delta A180 = 0.0^\circ$ ,  $\Delta C180 = 0^\circ$

$\Delta Z184 = 0.0\text{mm}$ ,  $\Delta A184 = 0.0^\circ$ ,  $\Delta C184 = 0^\circ$

$\Delta X188 = 0.0\text{mm}$ ,  $\Delta Y188 = 0.0^\circ$ ,  $\Delta Z188 = 0.0^\circ$



Interdépendance SF / paramètres  $\Delta$  ajustés



Détermination automatique des  $\Delta$  optimaux ?



Prise en compte écarts autour des consignes



Quelles mesures intermédiaires ? Quand ?



Variétés SF  $\oplus$   $\odot$   $\equiv$   $\nearrow$   $\angle$   $\perp$   $//$

## ***Conclusions, perspectives au-delà 2030 ?***

---

Les variations 3d sont rentrées dans les problématiques du tolérancement.

La chaîne numérique depuis l'analyse fonctionnelle jusqu'à la métrologie reste très discontinue.

La prise en compte des écarts de forme ajoute beaucoup de complexité dans la gestion des contacts.

Peu de solution pour gérer les architectures hyperstatiques.

L'intégration du comportement multiphysique d'un système reste un challenge.

Le découplage entre les modèles de comportement géométrique et mécanique est encore à ses prémices.

Les machines connectées permettent d'ajuster les gammes de fabrication.

L'appairage numérique pourrait remplacer l'appairage physique.