

Renan BONNARD - Olivier KERBRAT - Julien KERNINON

*Présentation du laboratoire de l'IRCCyN:
équipe MO2P
Modélisation et Optimisation des Process de Production*

*Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes
(IRCCyN)
UMR CNRS 6597
1, rue de la Noë, BP92101, 44321 Nantes Cédex 03
France*

IRCCyN Unité mixte de recherche (UMR CNRS 6597)



Unités de rattachement:

CNRS

Ecole Centrale de Nantes

Université de Nantes

Ecole des Mines de Nantes



Thèmes de recherches:

Ils interviennent dans les domaines: analyse et commande des systèmes à événements discrets, traitement du signal, systèmes temps réel, conception de produits, process de production, robotique, psychologie.

Un laboratoire de qualité:

- 257 personnes
- 87 chercheurs et enseignants chercheurs
- 95 non permanents (doctorants, professeurs invités, post docs).

- Equipes de recherche ou projets

- Image Signal et Automatique

- Analyse et Décision en Traitement du Signal et de l'Image
- Commande
- Image et Vidéocommunication

- Psychologie, Cognition, and Technologie (PsyCoTec)

- Système Mécanique et Productique

- Méthode de Conception Mécanique
- Robotique
- Modélisation Optimisation Process Production (MO2P)
- Ingénierie virtuelle pour Génie Industriel
- Système logistique et de production

- Système de Production

- Analyse et Commande à Évènements Discrets
- Systèmes Logistiques et de Production
- Temps Réel
- Modélisation et vérification des systèmes embarqués



| |
|---------------|
| 23 membres |
| 3 PU |
| 4 MCF |
| 12 doctorants |

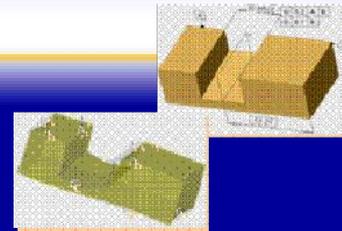
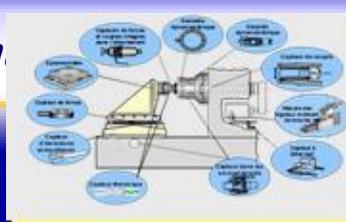
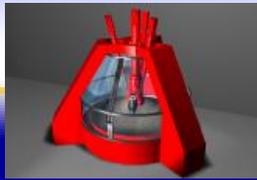
● Thématique

- « Manufacturing and Virtual Manufacturing »

● Objectif Global

- “ Être capable de définir, de simuler puis d'optimiser l'ensemble du process de fabrication d'une pièce mécanique dans un contexte de conception Produit/Process ” .

Équipe de Recherche



Intégration Spécificités UGV et FR
Systèmes de CFAO

Surveillance d'usinage

Optimisation paramètres
opérateurs en usinage et FR

Modélisation et quantification des
défauts de Production

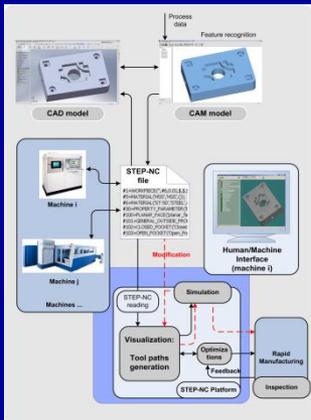


**Modèle
produit**

Ingénierie de Production Collaborative

**Projet
de fab.**

Produit



Étude Comparative
Procédés / Process

Méthodes de Réalisation du
Couple Procédé-Outillage



• Procédés de Fabrication / Enlèvement de Matière

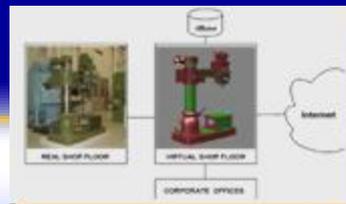
- Optimisation des paramètres opératoires en usinage
- Surveillance d'usinage

• Obtention des Pièces en Fabrication Rapide

- Étude Comparative des Procédés / Process Novateurs
- Méthodes de Réalisation du Couple Procédé-Outillage

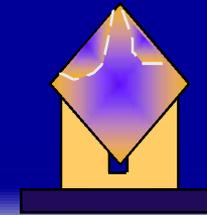
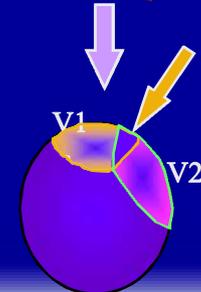
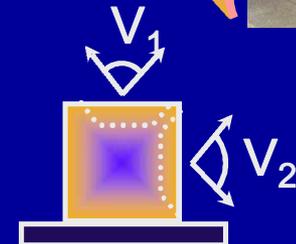
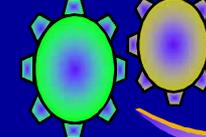
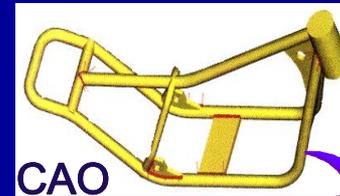
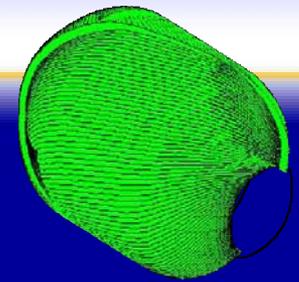
• Atelier Virtuel d'Ingénierie de Production

- Intégration des Spécificités UGV /ou FR systèmes de CFAO
- Modélisation et quantification des défauts de Production
- Ingénierie de Production Collaborative



Procédés

- Usinage, perçage, formage incrémental, ...
- Fabrication Rapide, soudage
- Intégration connaissances métier :
 - CFAO Enroulement filamentaire
 - CFAO Soudage
 - CFAO Fabrication Rapide
 - Choix de configuration de machines
 - ...

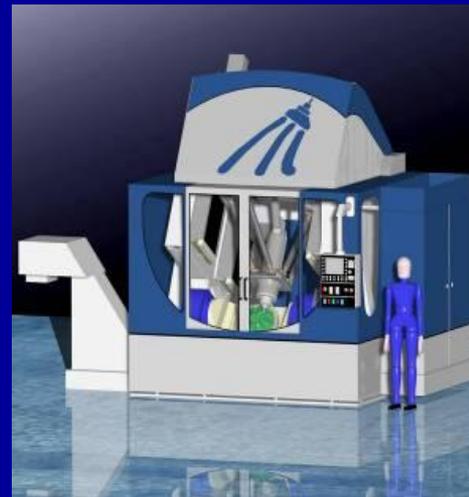


Cadre :

- Contrat de plan État Région CER – PRAP

Caractéristiques :

- 5 axes
- 24000 tr/min – 40kw - 76 Nm
- 50 m/min - 15 m/s²
- Changeur 20 outils
- DCN 840D



Cadre :

- Contrat de plan État Région CER
- Projet Région PL
- Projet industriel EMOA "Pole Véhicules Haut de Gamme"

Livraison :

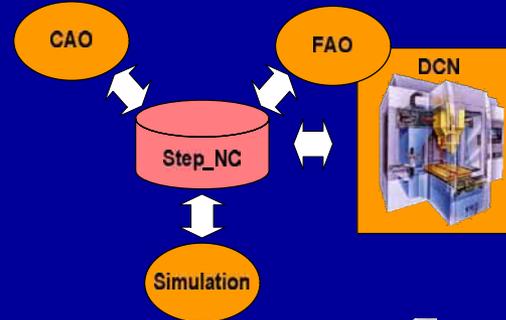
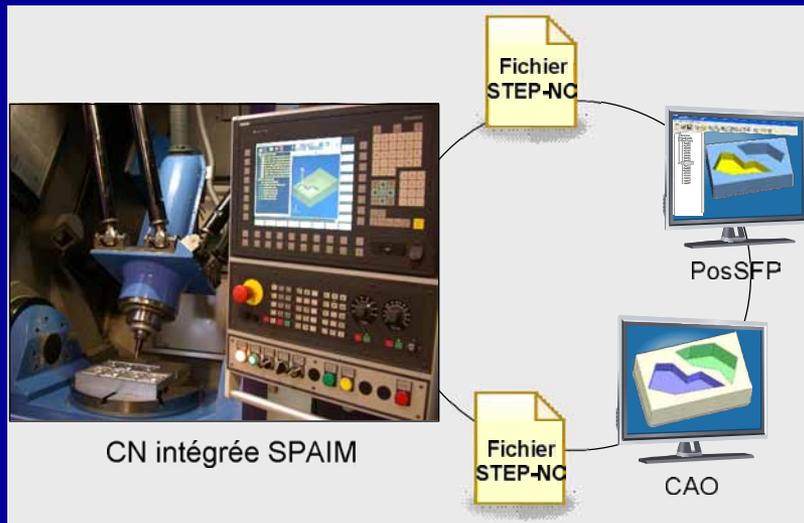
- Fin juillet 2009

Caractéristiques :

- 5 axes
- DCN 840D
- 2 sources laser
- Espace de travail 850mm³

Usinage :

- Programmation avancée des MOCN via STEP-NC : application aux machines parallèles
- Programmation intelligente (STEP-NC) des machines outils hybrides multifonctionnelles.



Fabrication rapide :

- Intégration des procédés de fabrication rapide dans une chaîne numérique STEP-NC

Renan BONNARD

Intégration des procédés de fabrication rapide dans une chaîne numérique STEP-NC

Contexte général

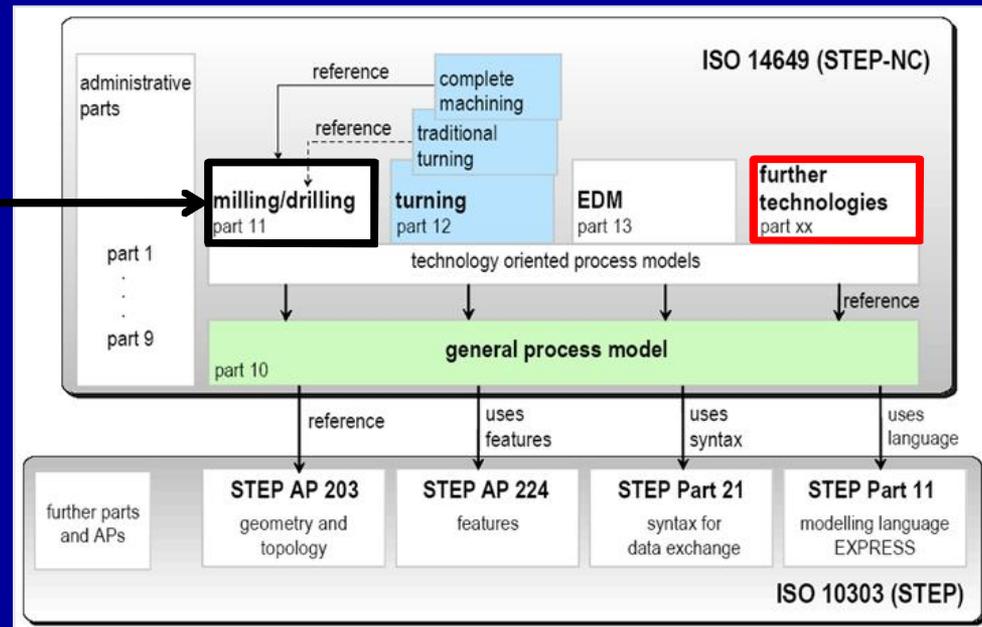


Contexte général

Au sein de l'équipe MO2P plusieurs travaux de recherches ont été menés au niveau du fraisage pour l'ISO 14649 part 11, 49th, 50th, 51st, 56th ISO TC 184/SC 4 meetings.

Au niveau de la fabrication rapide, l'équipe fait partie intégrante du développement de la norme STEP-NC pour les procédés par ajout de matière, avec pour mission dans un premier temps de faire une proposition de norme pour 2009 (ISO 14649 part 17).

Plusieurs travaux ont déjà été présentés comme pour l'usinage (49th, 50th, 51st, 56th ISO TC 184/SC 4 meetings).



Rapid Manufacturing Part 17

Evolution des procédés par ajout de matière

Prototypage rapide
utilisé comme aide
visuelle (fabrication
d'un unique
prototype)

Evolution ces dernières
années des procédés par ajout
de matière

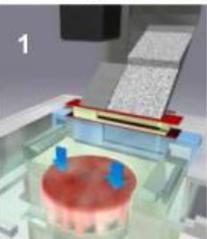


Fabrication rapide
avec la réalisation
directe de pièce et/ou
de petites séries de
pièces

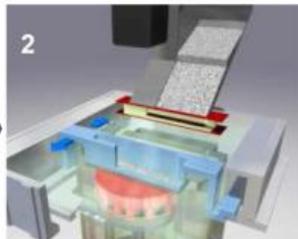
Depuis un modèle CAO
un modèle STL est

3D-CAD +
Technology data

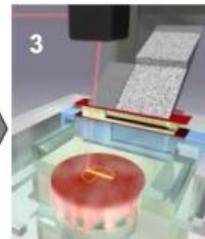
Process steps



1
lower baseplate



2
recoat powder



3
scan layer

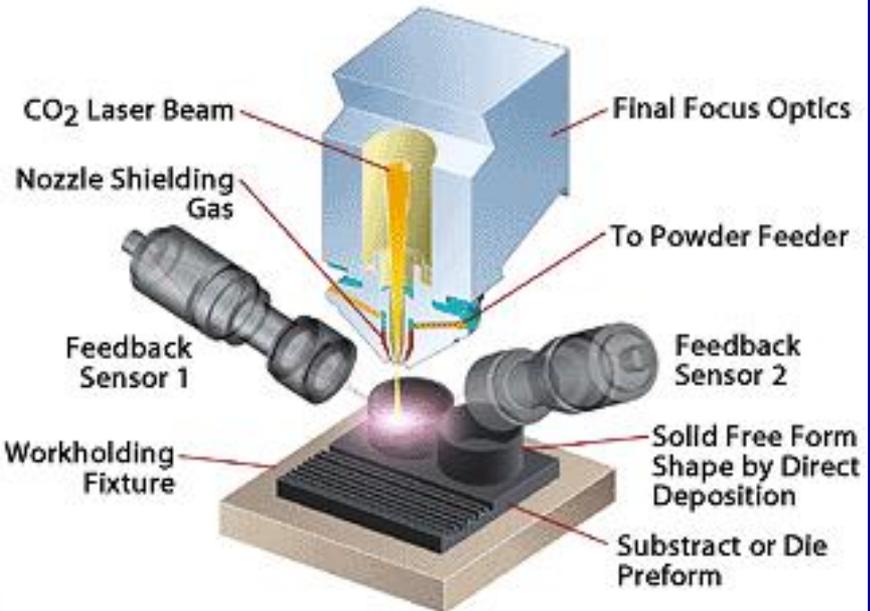
finishing
operation



Model

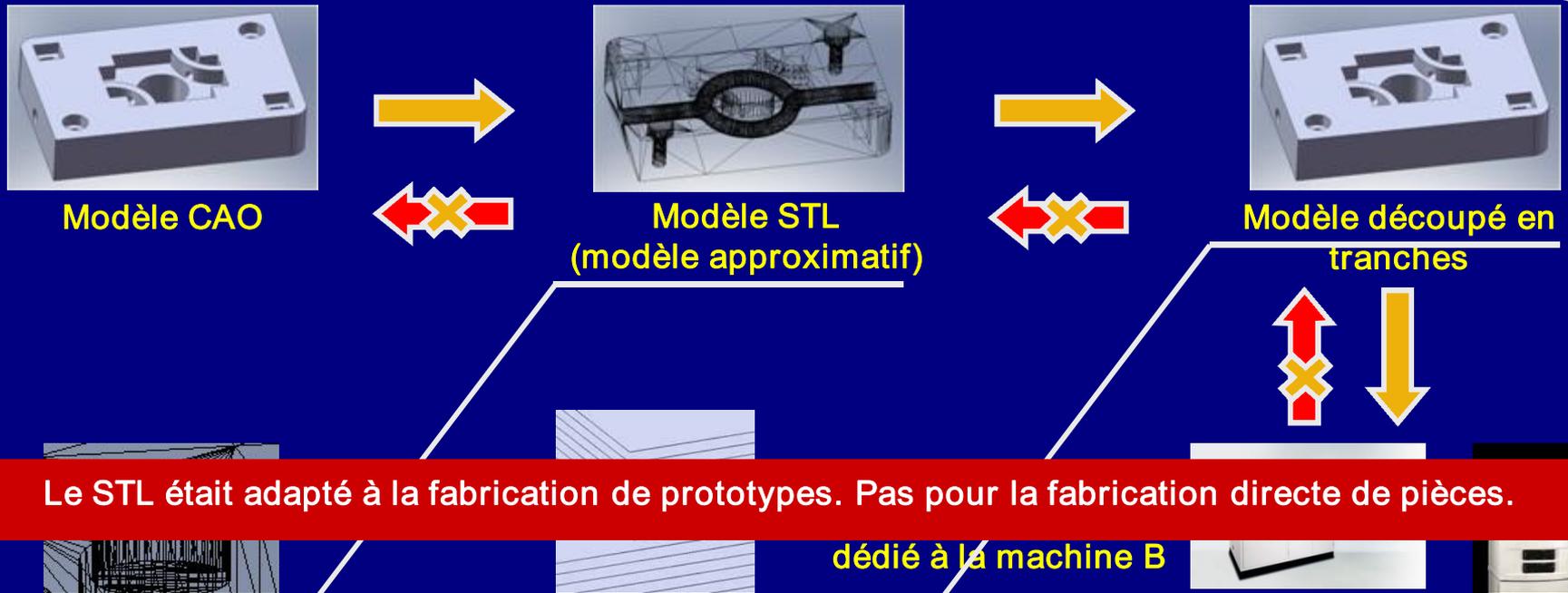
finition sont réalisées.

Final part



Projection de poudre

Chaîne numérique actuelle avec le format STL



~~Informations géométriques:~~

- ~~- Tolérances~~
- ~~- Propriétés mécaniques~~
- ~~- Motifs des surfaces~~

Précision du modèle STL?
Capacités du logiciel?

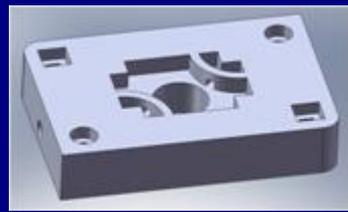
Découpage de la pièce possible dans une unique direction: inadapté aux différentes spécifications de la pièce.
Comment déterminer la hauteur de tranche pour toute la pièce?

Que font les différents logiciels?

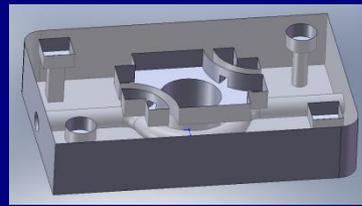
Autant de configurations possibles que de couples logiciel CAO / machine.
Retour de l'information impossible.

Proposition d'un nouveau format: le format STEP

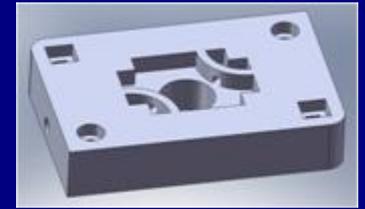
Proposition de chaîne numérique avec le format STEP-NC



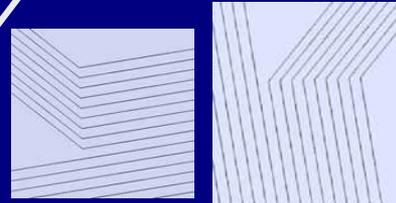
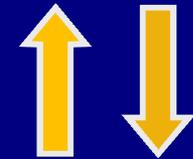
Modèle CAO



Modèle STEP
(description par entités
exactes)



Modèle découpé en
tranches



Préparation générique
de la fabrication sur
différentes machines



Pour l'instant
uniquement des entités
d'usinage →
développement d'entités
de fabrication rapide

Informations géométriques:

- Tolérances
- Propriétés mécaniques
- Motifs des surfaces

Modèle exact.
Description par entités de
fabrication.

Découpage de la pièce possible
dans plusieurs directions:
possibilités d'adaptation aux
spécifications et à la complexité
de fabrication.

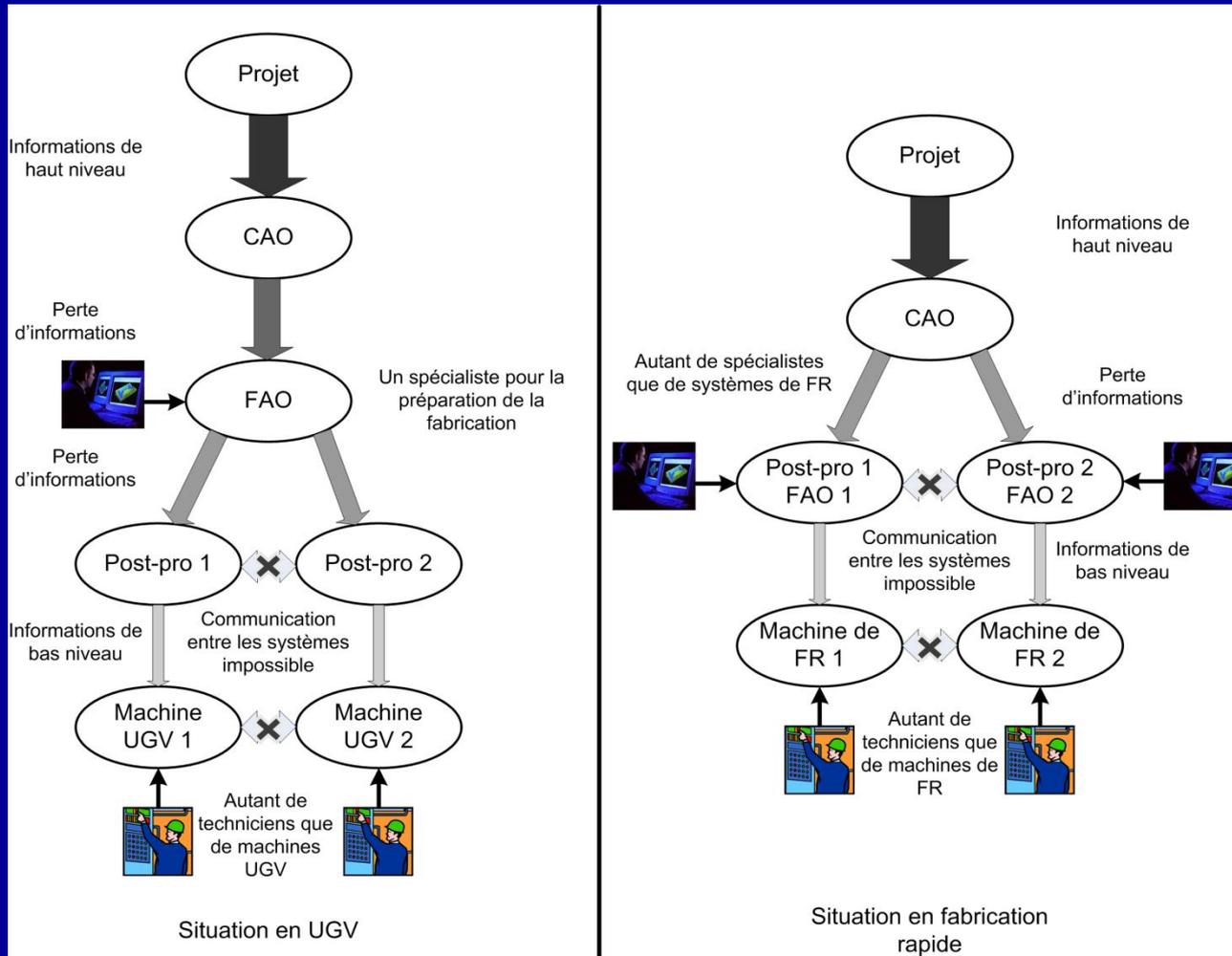
Possibilité d'avoir des stratégies
de fabrication différentes
suivant le type de tranchage.

Même modèle de FAO pour la
préparation de la fabrication sur
différentes machines?

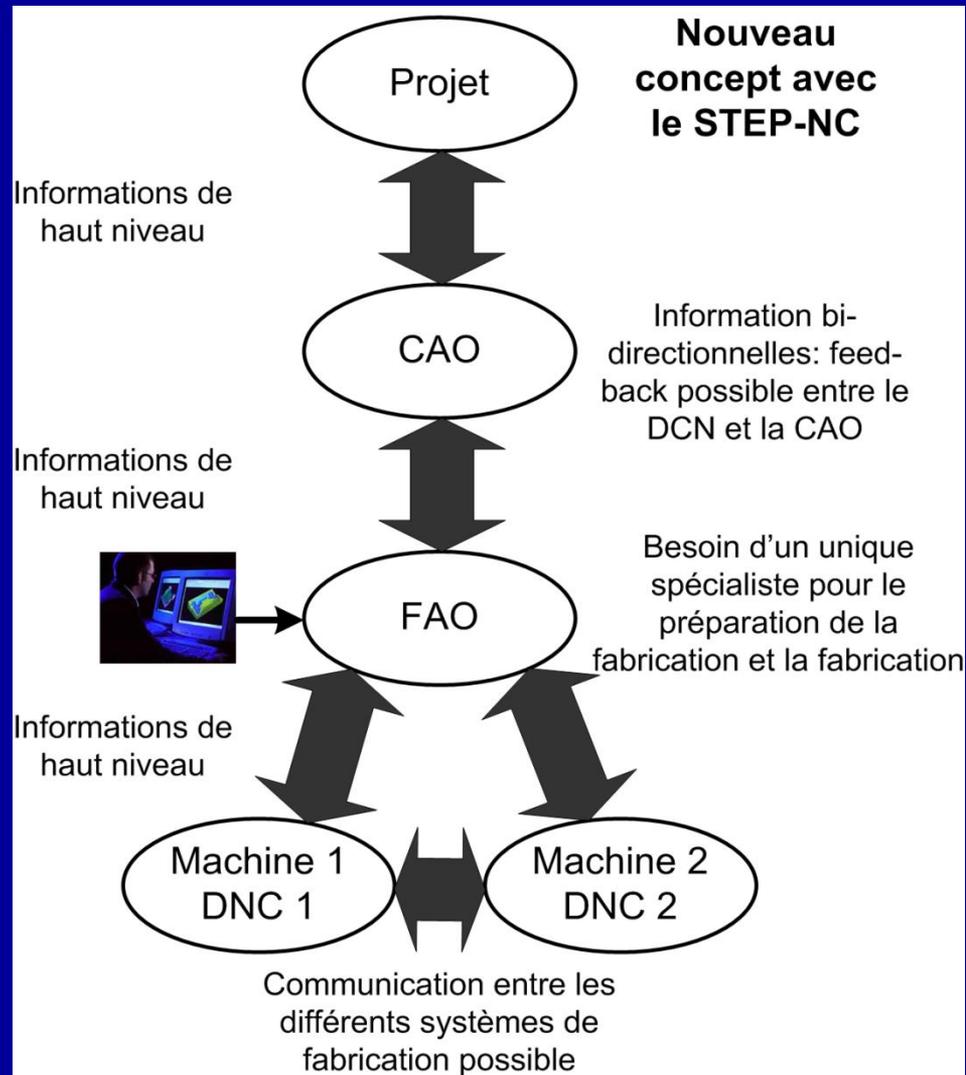
Plus de multiplication des post-
processeurs.

Retour d'information possible
entre la CN et la CAO.

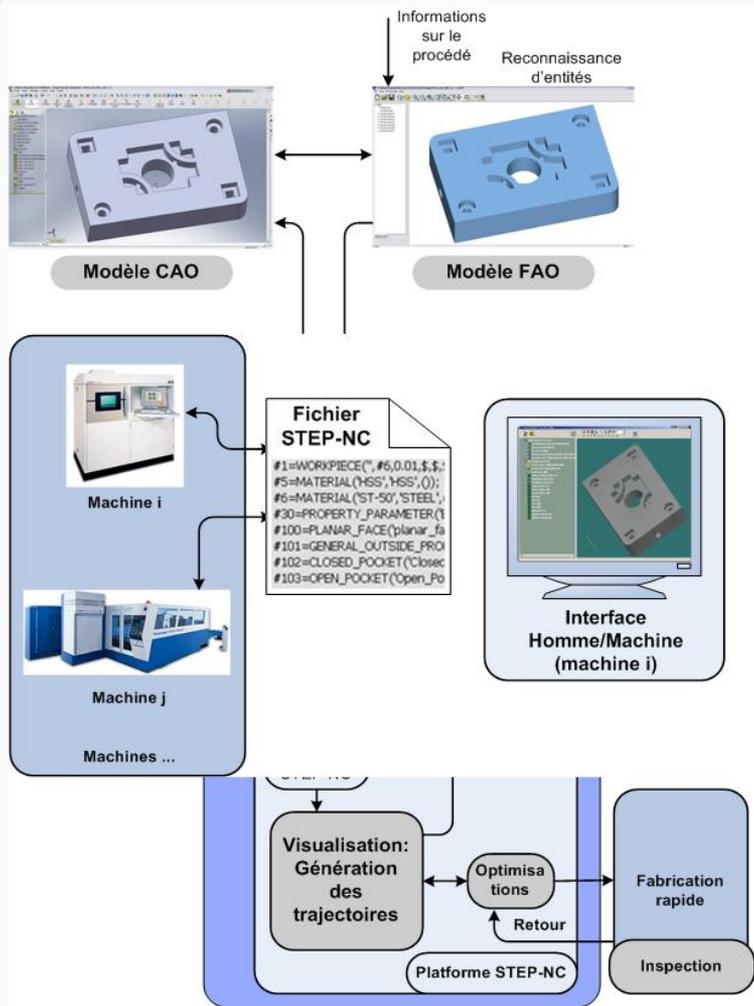
Nouveau concept de chaîne numérique STEP-NC



Nouveau concept de chaîne numérique STEP-NC



Nouveau concept de chaîne numérique STEP-NC



Taille réduite du fichier STEP-NC (informations de haut niveau, orientés objets)

Un unique fichier STEP-NC peut être directement traité sur différentes machines

Transfert de l'intelligence vers la CN

Feed-back de la CN vers CAO/ FAO

Modifications pied machine possibles de la géométrie et des paramètres de fabrication

Nouvelles possibilités d'optimisation et de simulation au sein de la CN

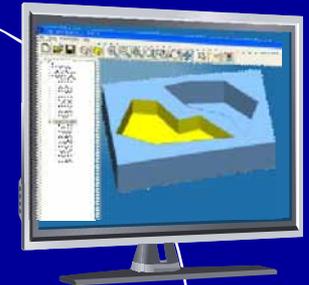
Développement d'une plateforme CN STEP-NC



CN intégrée SPAIM



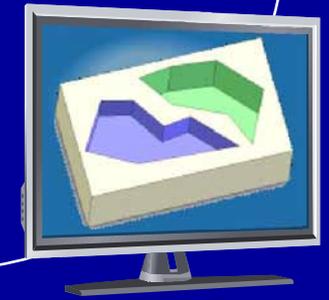
Fichier STEP-NC



PosSFP-RM



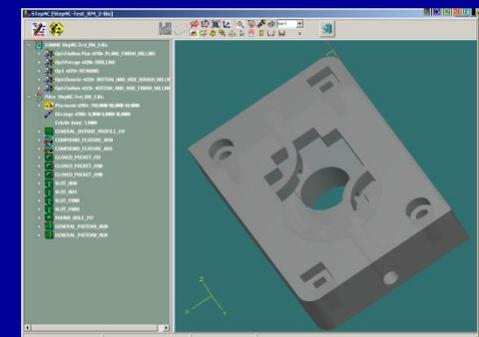
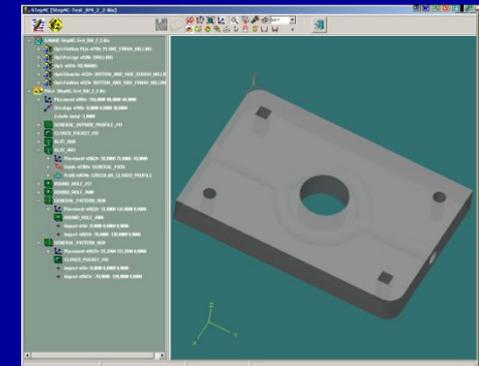
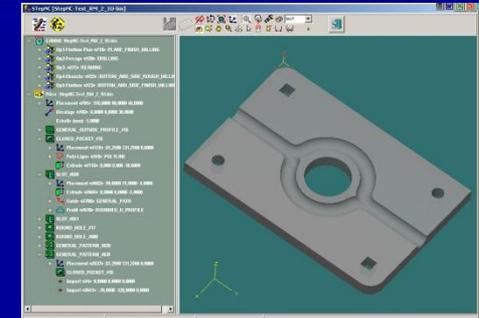
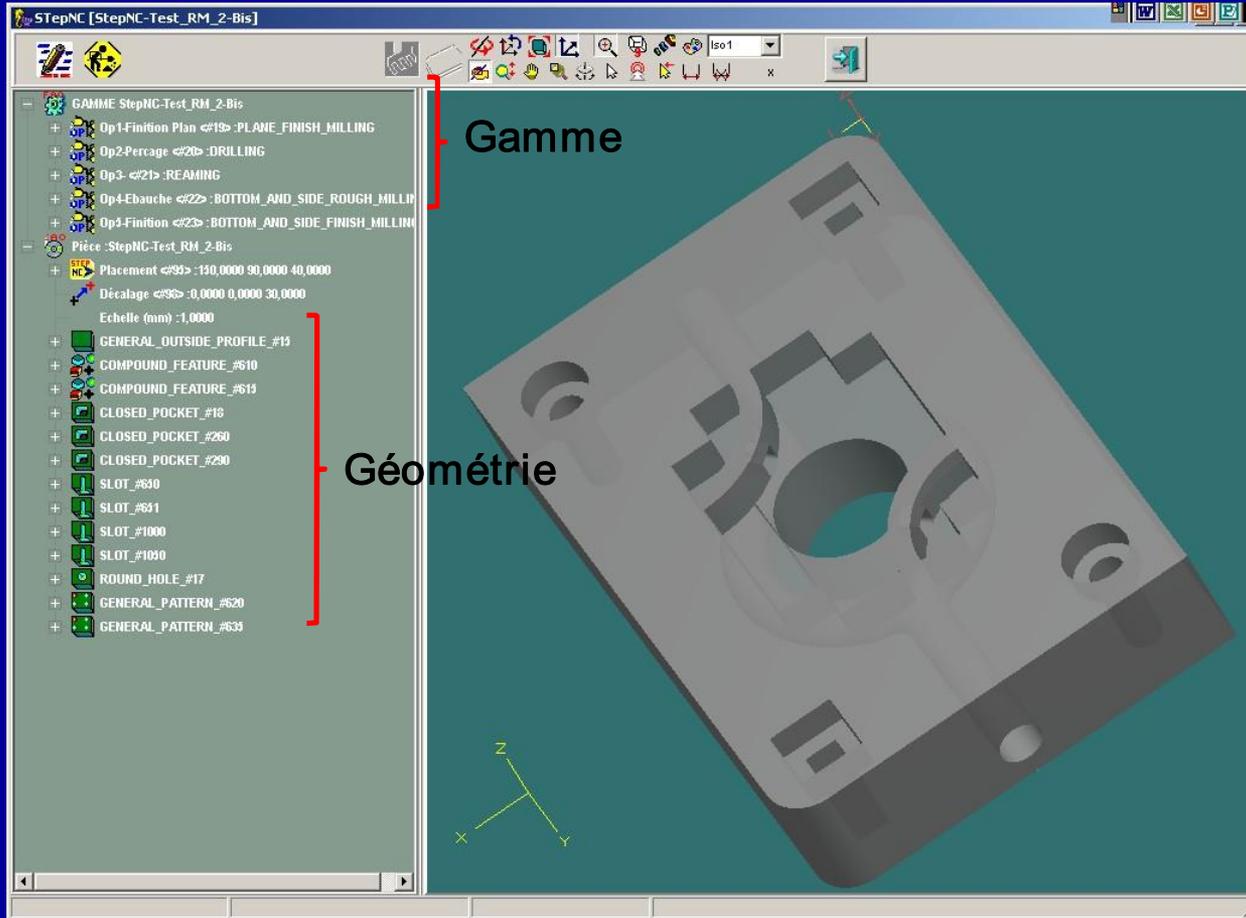
Fichier STEP-NC



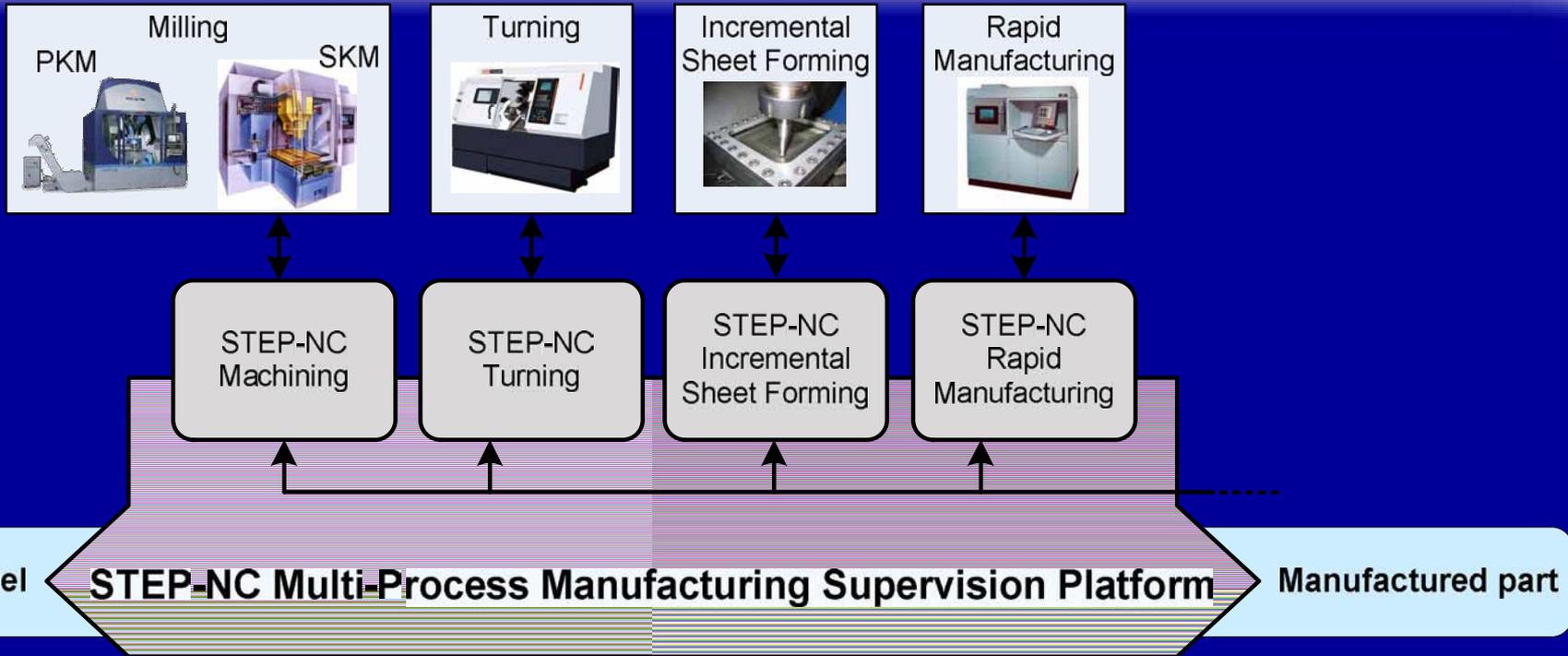
CAO

SPAIM :
STEP-NC Platform for Advanced and Intelligent Manufacturing

Nouveau concept de chaîne numérique STEP-NC

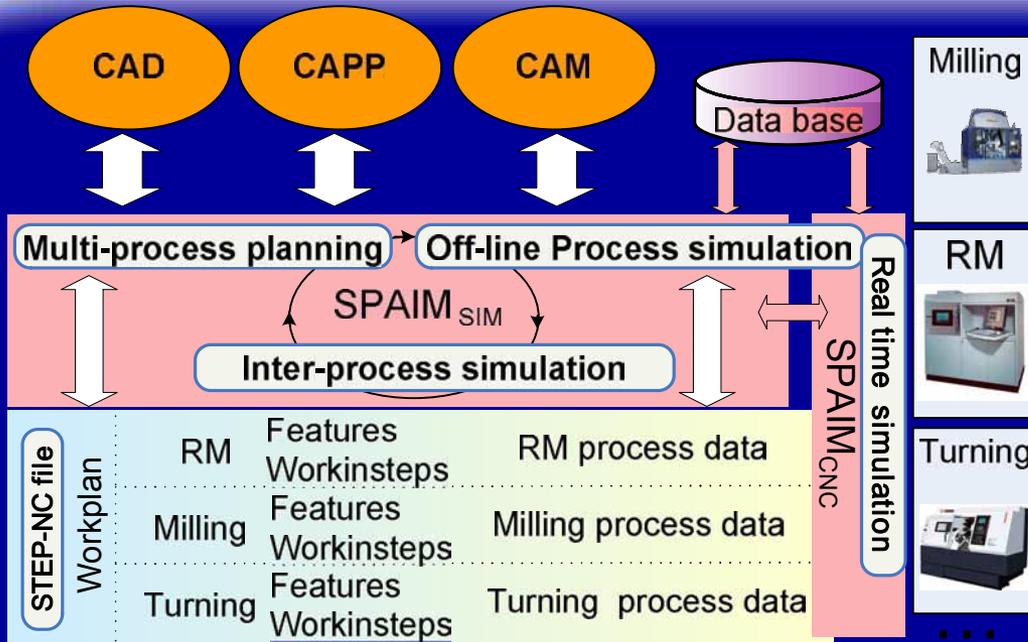


Concept multi-procédés



- Rendre interopérables plusieurs procédés
- Plate-forme intégrant une maquette numérique multiprocess
- Rendre interdépendantes les différentes paramétrisations liées aux procédés
- Opportunité avec la définition orientée objet des entités de fabrication dans STEP-NC

Concept multi-procédés

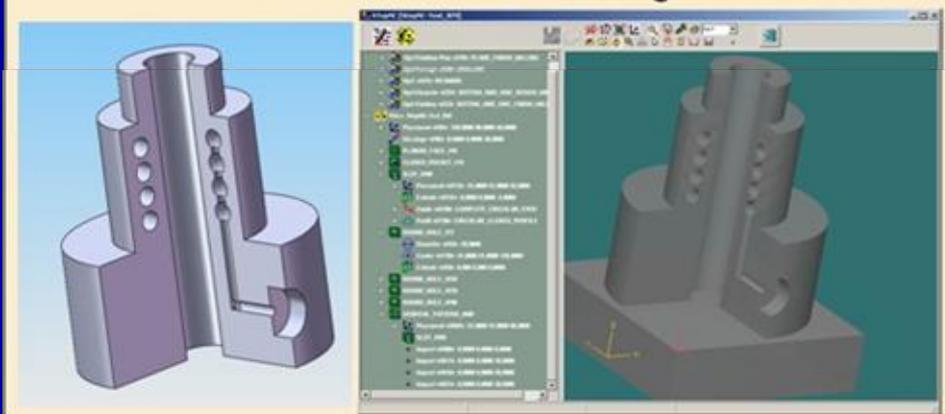


- Espaces de simulation multi-process
- Mise en place dans SPAIM
- Environnement multi-process totalement intégré dans la chaîne numérique
- Nouvelles possibilités

Part Test 1 : RM + Milling



Part Test 2 : RM + turning



- **Standard prometteur**
- **Approche orientée objet**
- **S'appuie sur la norme STEP largement répandue**
- **Possibilités nouvelles :**
 - Génération de trajectoires outils
 - Approche multi procédés
 - Intelligence déportée dans la CN
 - Adaptation temps réel des trajectoires d'outils
- **Attente des utilisateurs industriels**
- **Changement profond de la chaîne numérique en vue de l'intégration de la fabrication**
- **Nécessité de tous les acteurs dans leurs champs de compétences**

Julien KERNINON

*Fabrication directe par ajout de
matière de pièces métalliques*

● Trois principaux types d'approches:

HSM

EDM

Subtractive processes

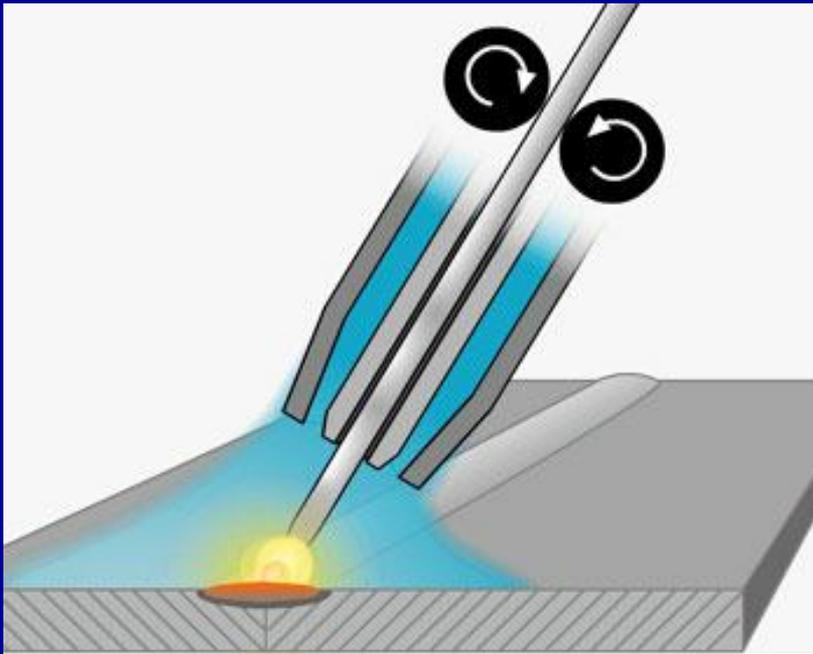
LENS

EBM

GMAW

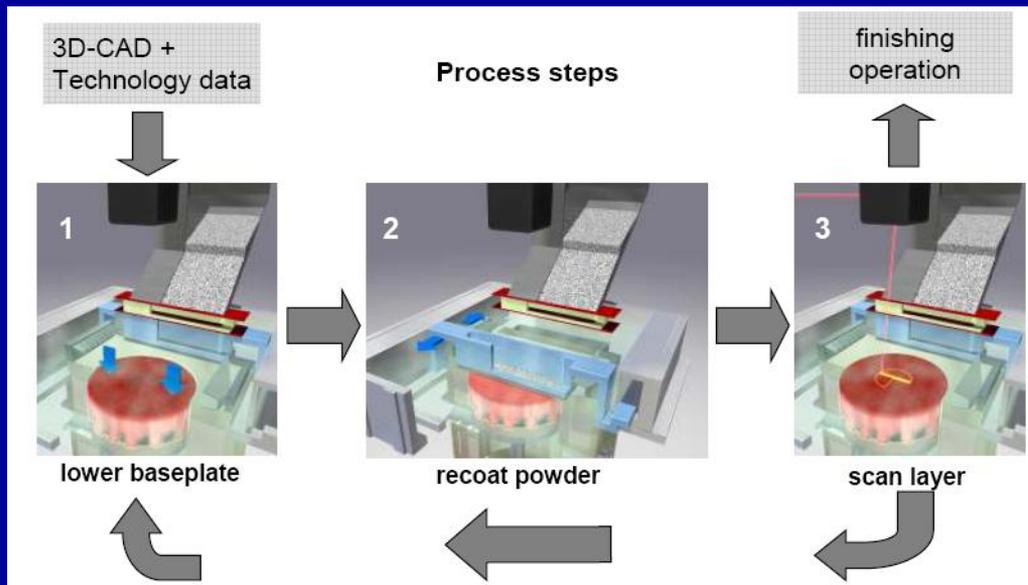
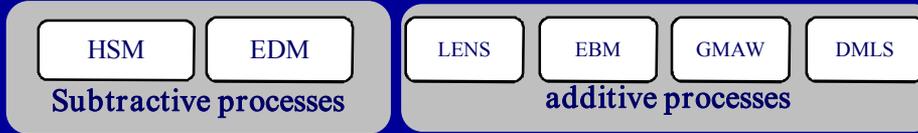
DMLS

additive processes

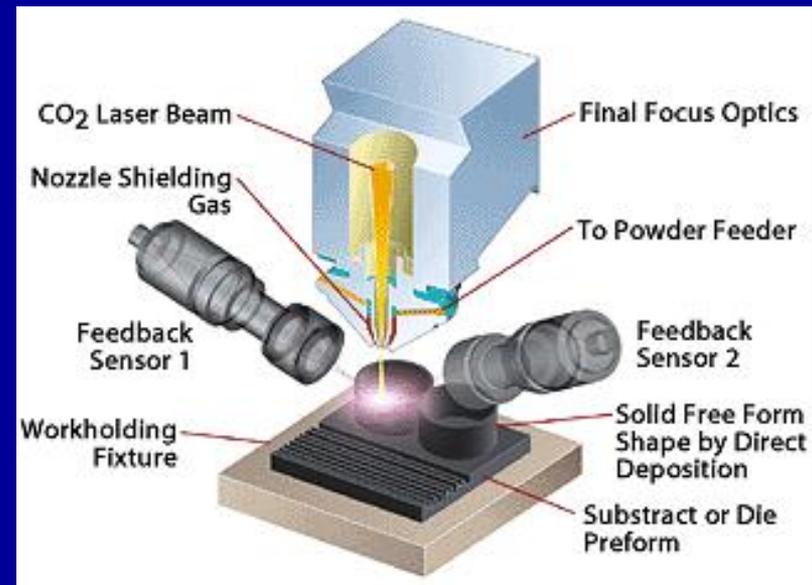


dépôt de fil

Trois principaux types d'approches:



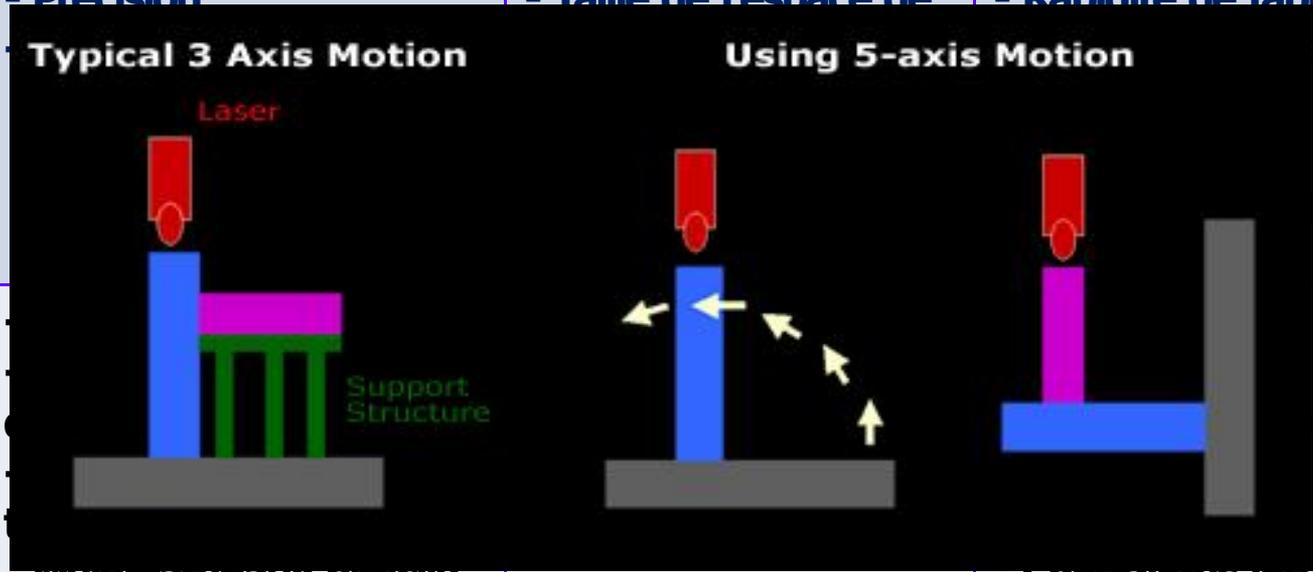
lit de poudre



projection de poudre

Trois principaux types d'approches:

| | Lit de poudre | Projection de poudres | Dépôt fil |
|---------------|--|---|--|
| avantages | <ul style="list-style-type: none"> - Précision | <ul style="list-style-type: none"> - Taille de l'espace de | <ul style="list-style-type: none"> - Rapidité de fabrication - Bonne tenue des matériaux - Propriétés |
| inconvénients | <ul style="list-style-type: none"> - Multimaternaux difficile - Contraintes internes | | <ul style="list-style-type: none"> - Contraintes internes |



Exemples d'utilisations des procédés de projection de poudre

- Fabrication directe:



- Utilisation de préformes planes ou de supports plan

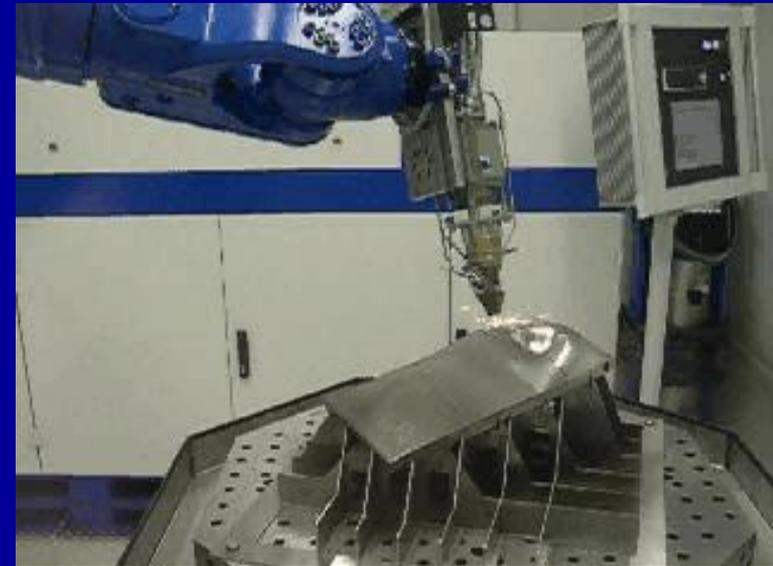
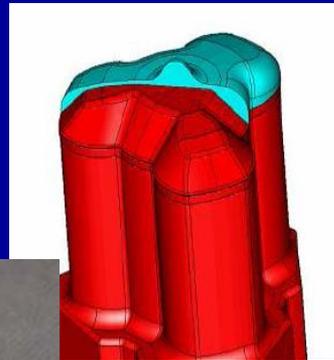


Fabrication d'une pièce complète sur un support

Brut obtenu par dépôt de matière sur une préforme simple et usiné par la suite

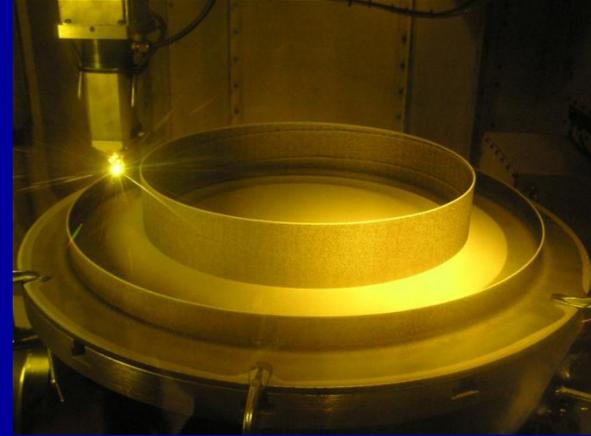
● Exemples d'utilisations des procédés de projection de poudre

- Rechargement => fabrication hybride



● Axes de recherche

- Fabrication par zones:

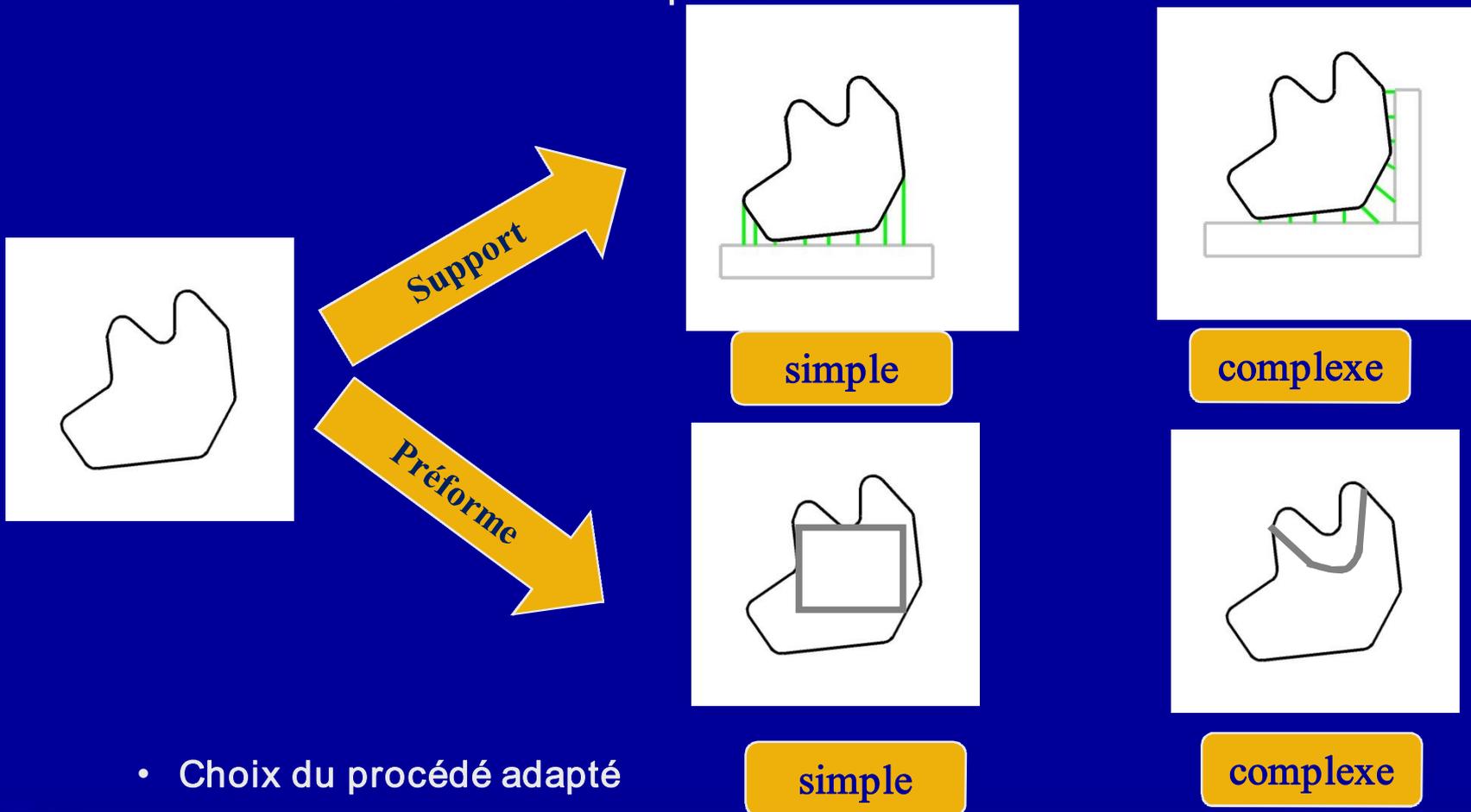


- Stratégies 5 axes
 - Tranchage
 - Trajectoires



● Axes de recherche

- Fabrication sur formes complexes:

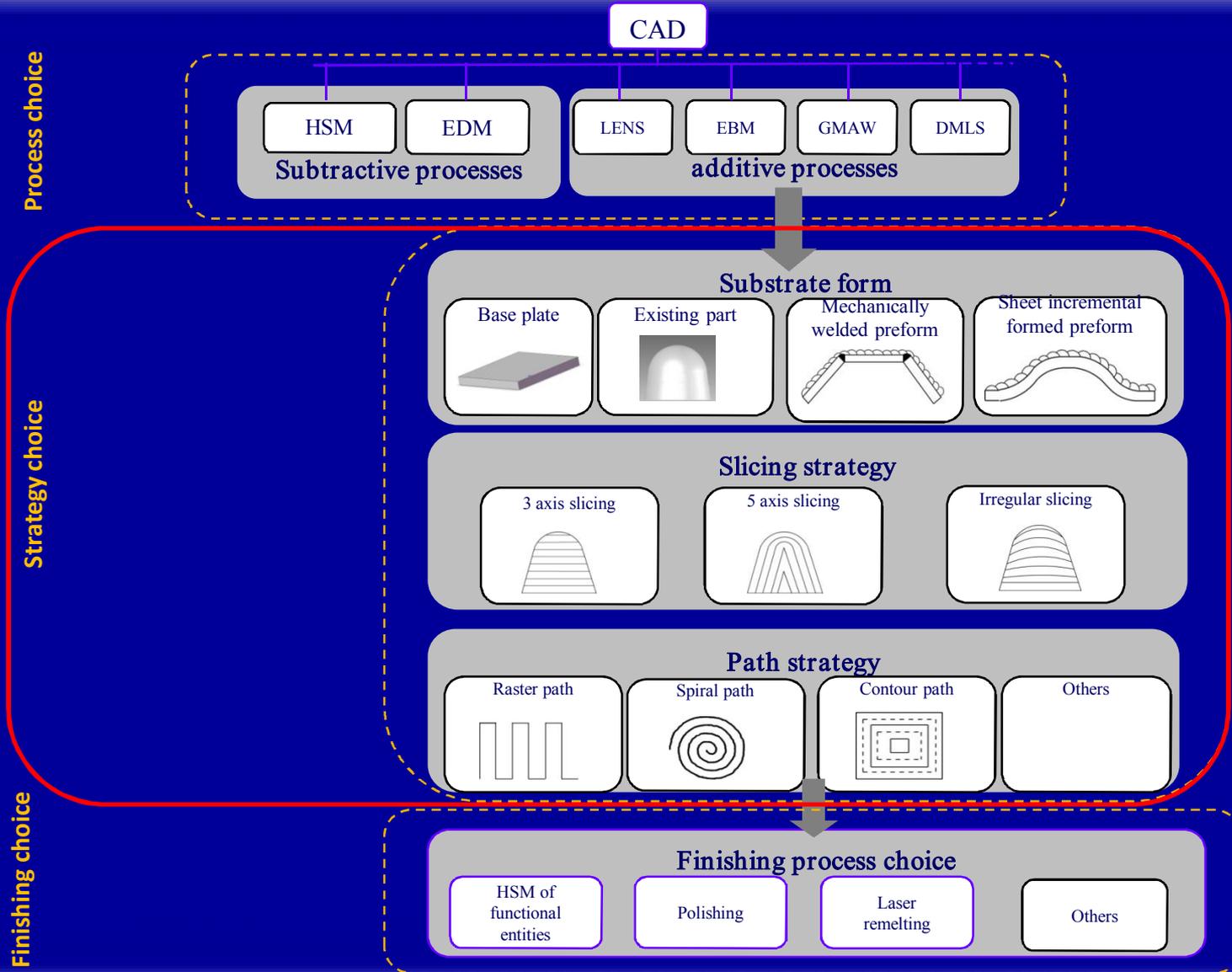


- Choix du procédé adapté

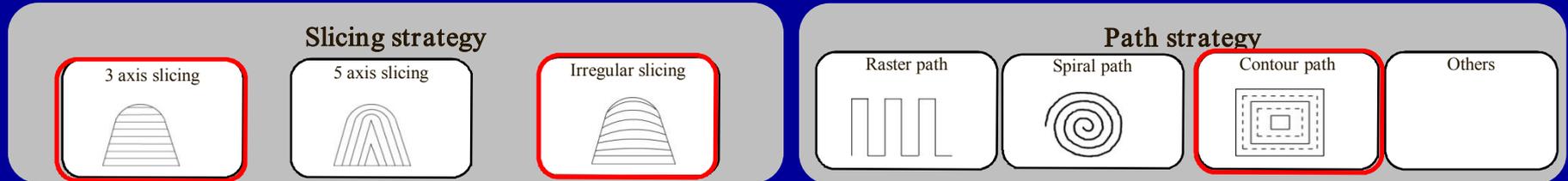
simple

complexe

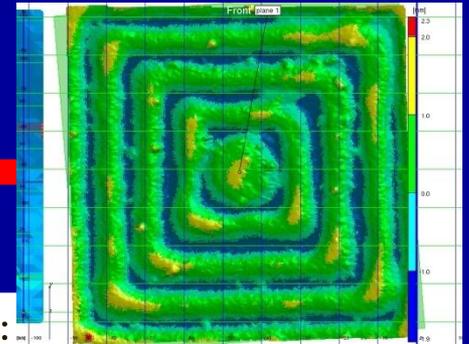
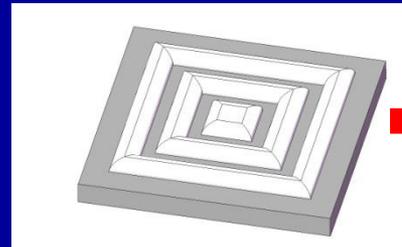
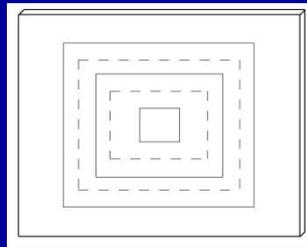
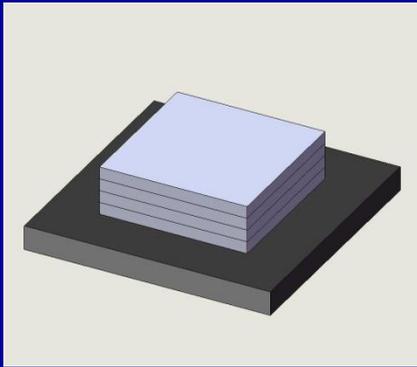
Mise en place d'une méthodologie de choix



Différentes stratégies de découpe et de trajectoires possibles:



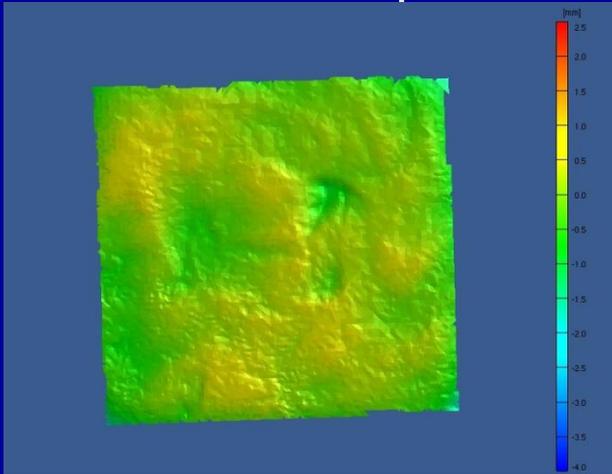
Stratégie dite du contour contraint



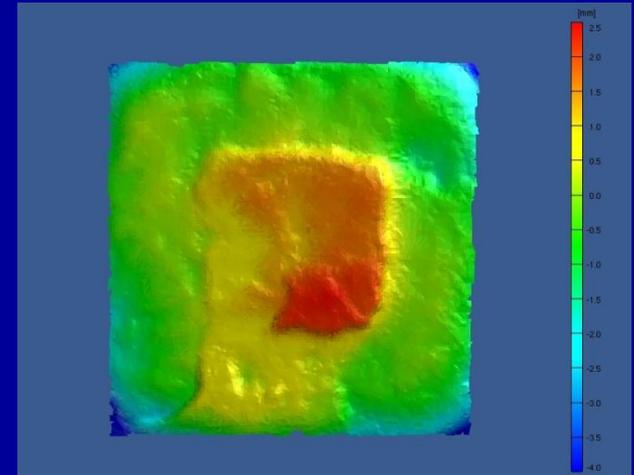
: Ridge weld

Comparaison des deux stratégies

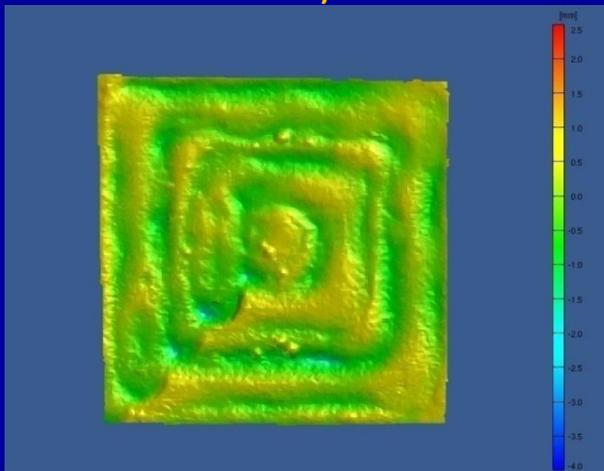
- Défaut de planéité



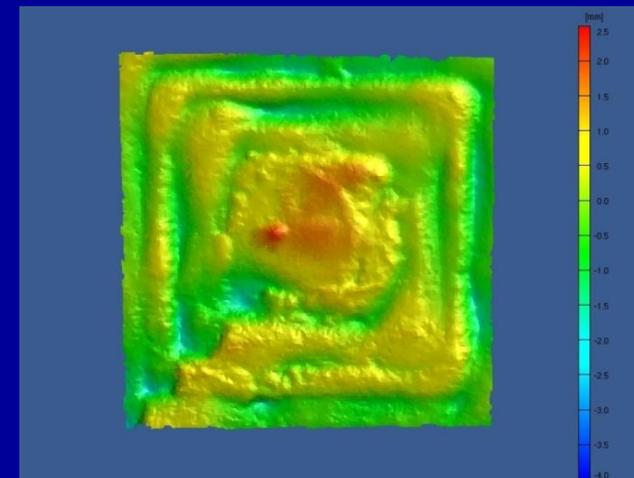
couche 1: défaut de planéité de 1.4mm



couche 4: défaut de planéité de 5mm

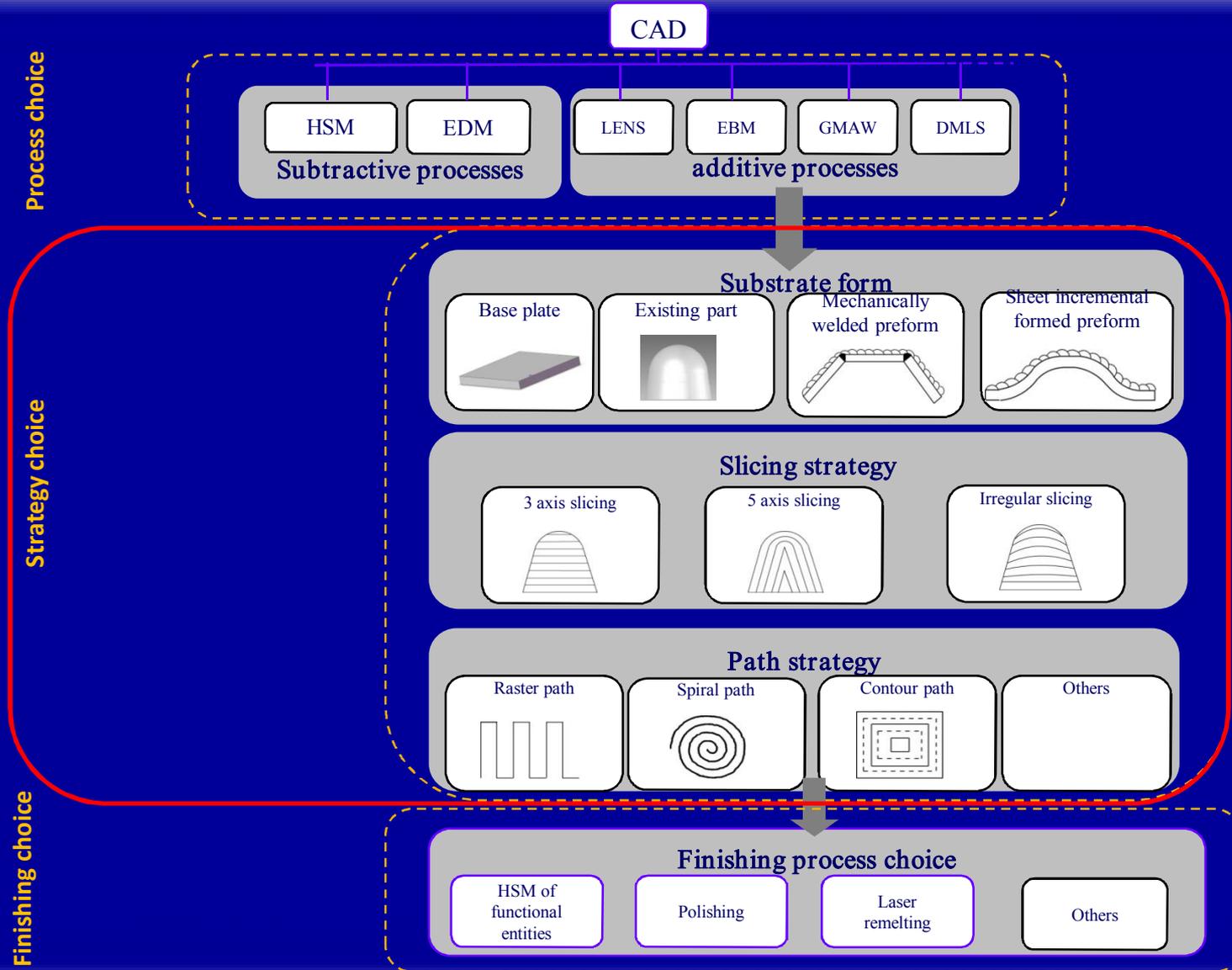


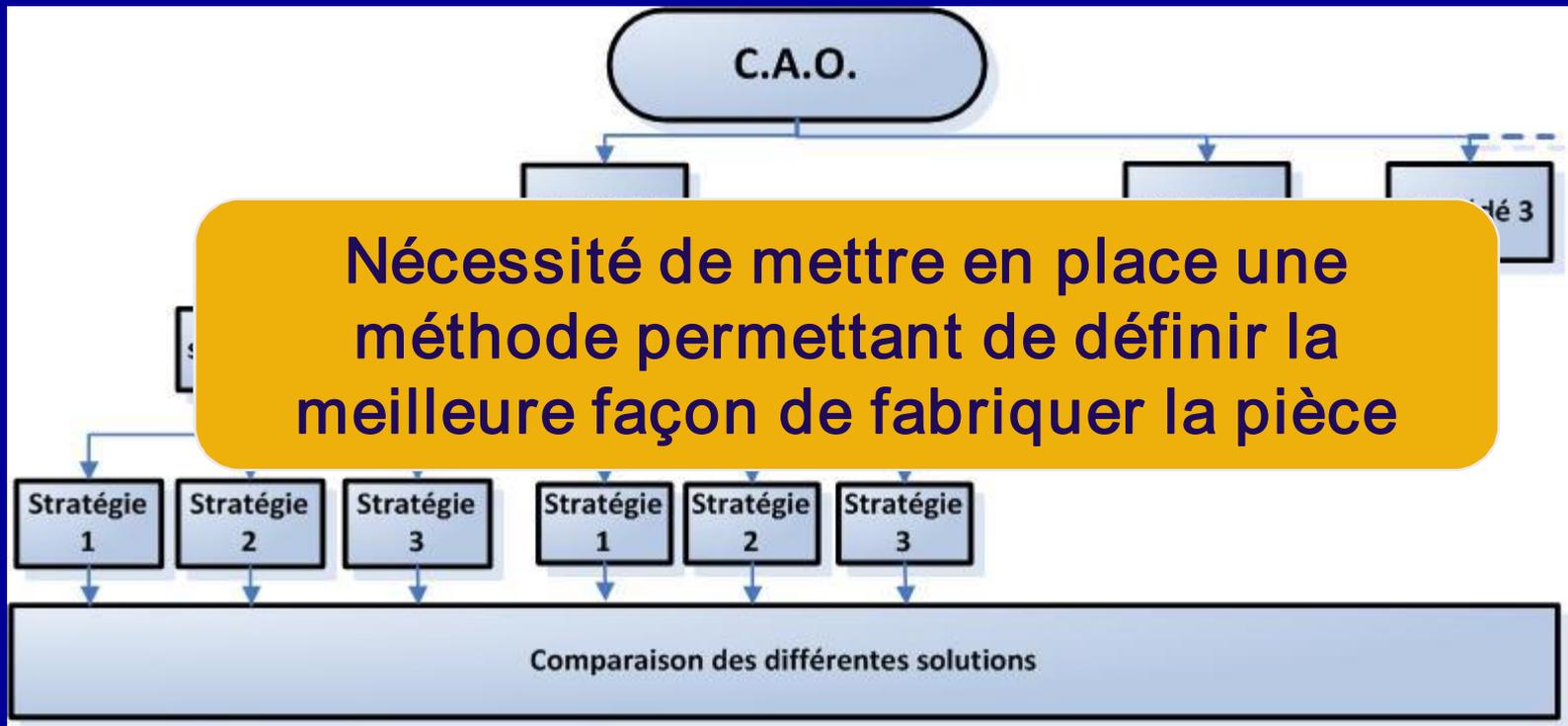
couche 1: défaut de planéité de 2.4mm



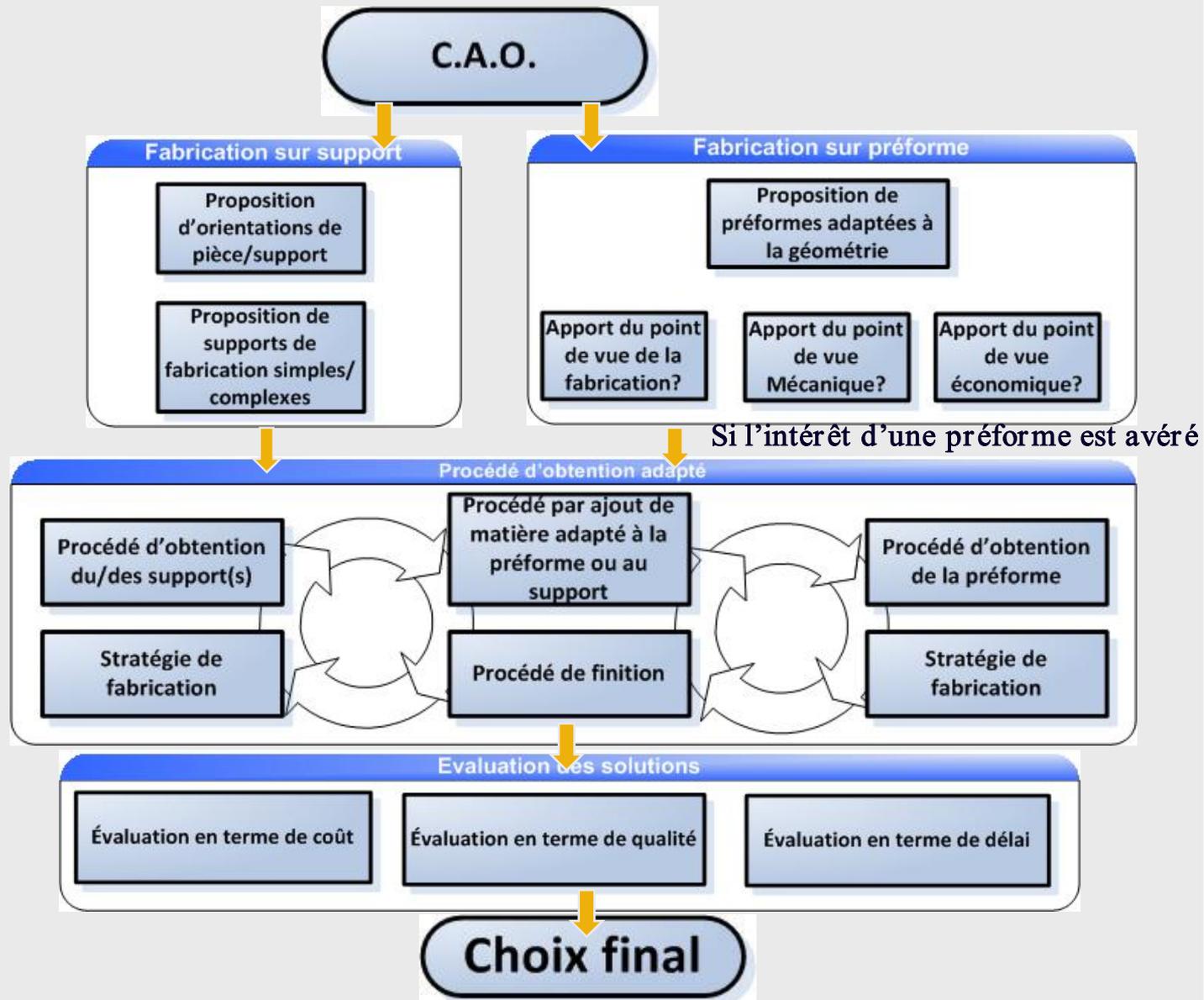
couche 4: défaut de planéité de 4mm

Mise en place d'une méthodologie de choix



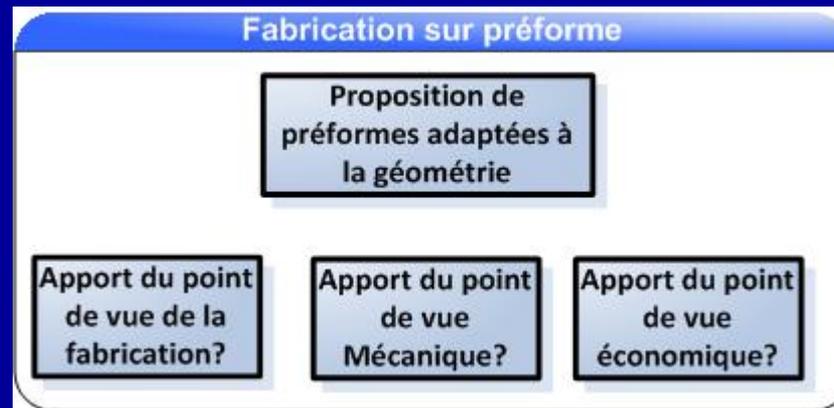


Mise en place d'une méthodologie de choix

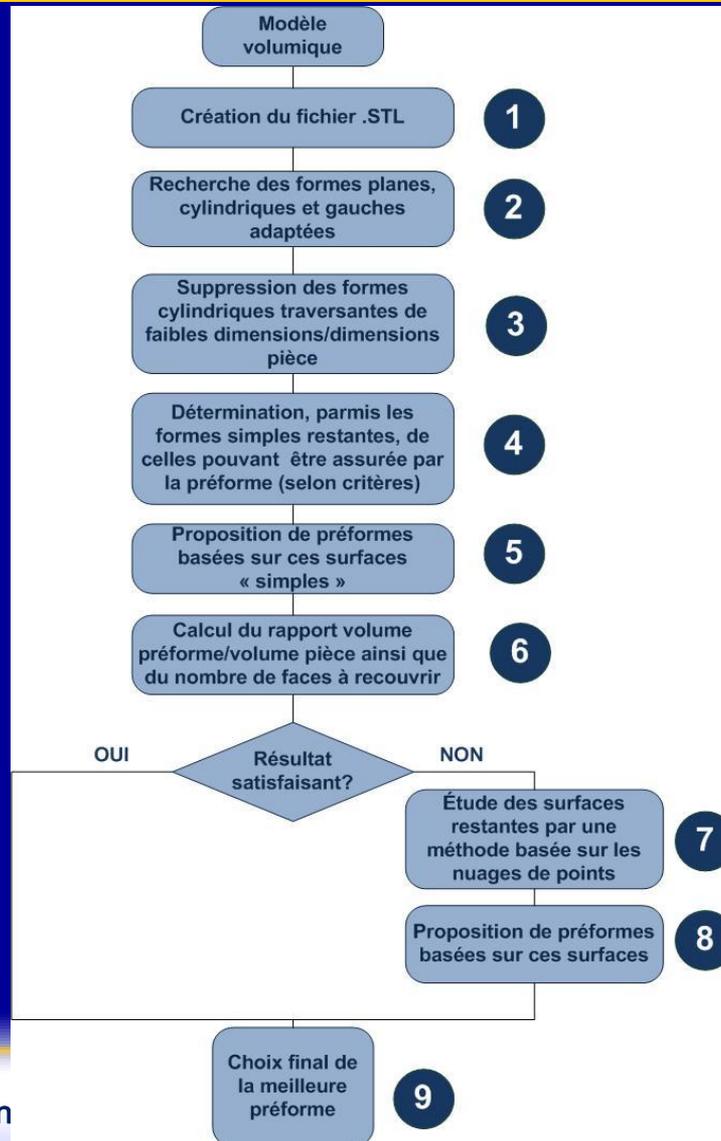


● 1ere étape: Proposition de préformes adaptées

- Mise en place d'une méthode de définition de préforme basée sur la CAO de la pièce

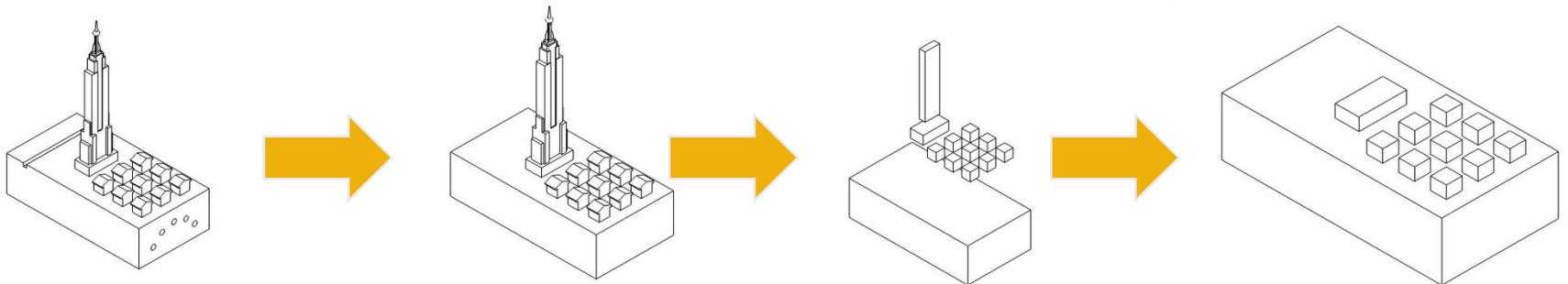
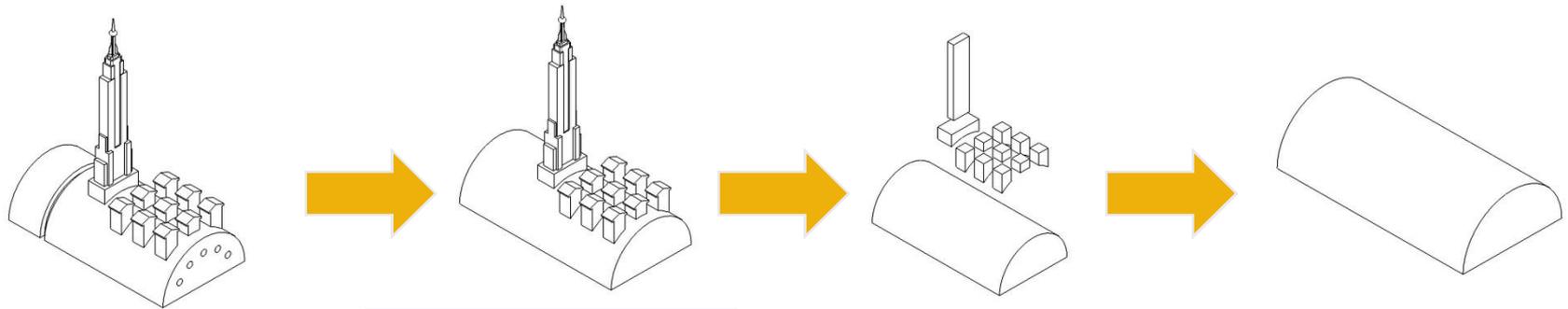


1ere étape: Proposition de préformes adaptées

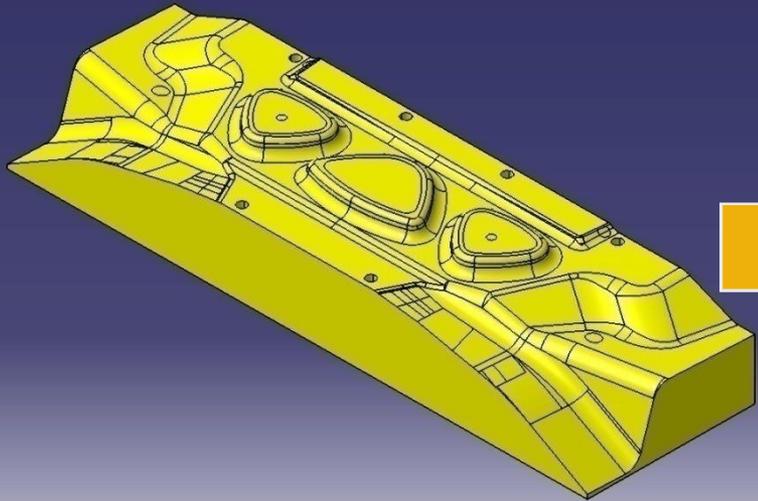


1ere étape: Proposition de préformes adaptées

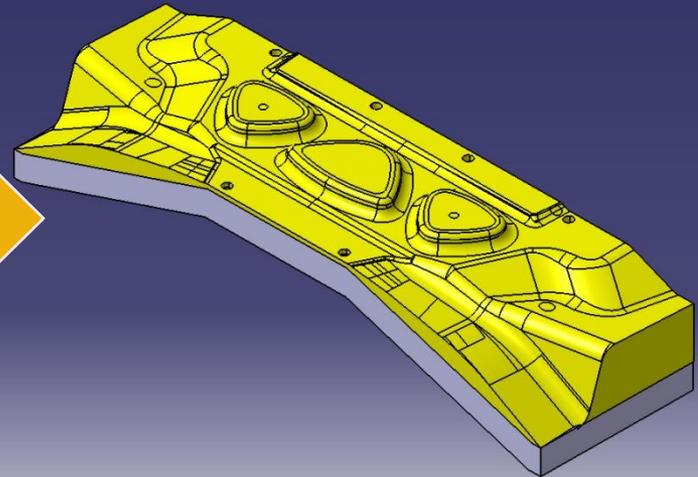
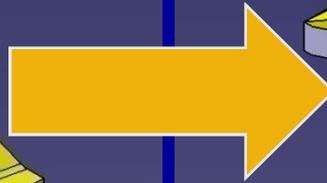
- Mise en place d'une méthode de définition de préforme basée sur la CAO de la pièce



● Application sur un outillage PSA



Poinçon



Proposition de préforme mécano-soudée (sans renforts)

Olivier KERBRAT

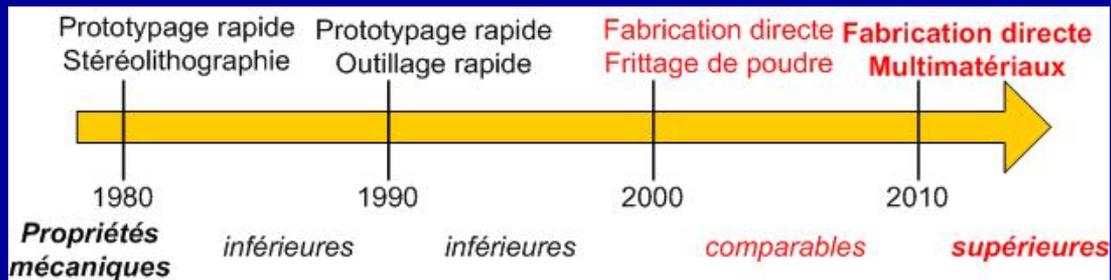
Méthode de conception d'outillages modulaires hybrides basée sur l'évaluation quantitative de la complexité de fabrication

● Évolution de l'industrie des produits manufacturés

Objectifs

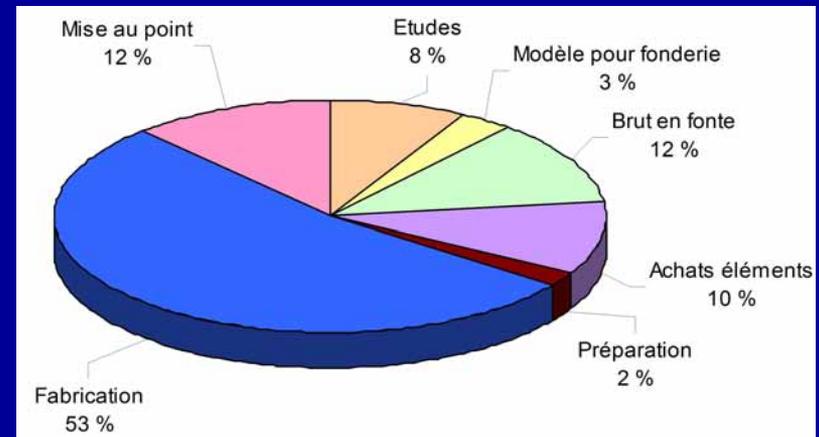
- Coût ↘
- Délai ↘
- Qualité ↗
- Flexibilité ↗
- Impact environnemental ↘

- Évolution de l'industrie des produits manufacturés
- Évolution des techniques de fabrication par ajout de matière
 - Du prototypage rapide à la fabrication directe



- Des procédés pour fabriquer des pièces métalliques qui arrivent à maturité (**lit de poudre, projection de poudre**)

- Évolution de l'industrie des produits manufacturés
- Évolution des techniques de fabrication par ajout de matière
- La fabrication d'outillage
 - Réalisation de formes complexes dans des matériaux aux propriétés mécaniques spécifiques
 - Importance de la maîtrise de la fabrication des outillages
 - Procédés :
 - usinage grande vitesse
 - (électroérosion)
 - procédés par ajout de matière



Répartition des coûts d'un outillage d'emboutissage dans le domaine automobile

Maîtrise de la fabrication d'outillages, intégrant des procédés par ajout de matière, permettant de répondre aux multiples objectifs.

● L'outillage modulaire hybride

- Définition et exemples
- Problématique

● Méthodologie de conception d'outillages modulaires hybrides

- Représentation schématique de la méthode

● Analyse de complexité de fabrication

- Indices locaux / Indices globaux
- Décomposition octree
- Définition et calculs des indices

● Utilisation de la méthodologie

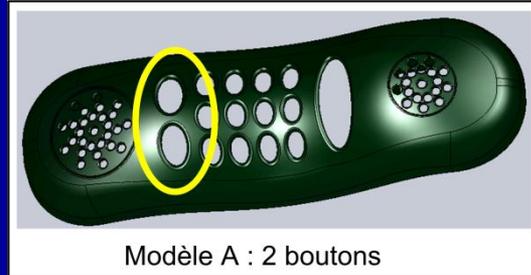
- Exemple d'utilisation avec application de l'approche modulaire
- Exemple d'utilisation avec application des approches modulaires et hybrides

● Synthèse

Définition et exemples

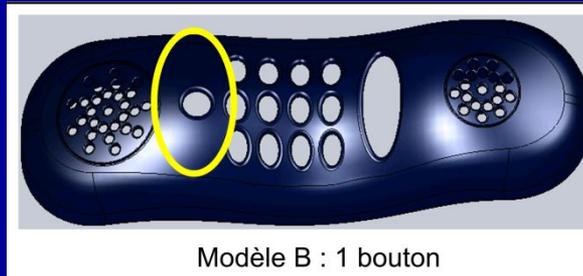
- ~~Outillage monobloc~~ **Outillage modulaire hybride**
- Aspect modulaire
 - Prend en compte les variantes de la pièce à obtenir

Flexibilité

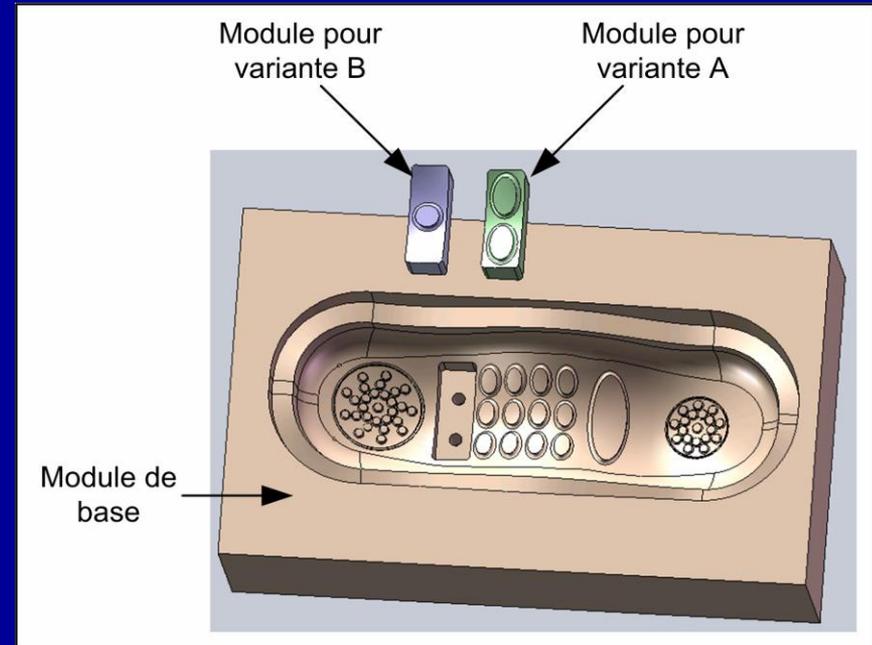


Modèle A : 2 boutons

Coûts de fabrication



Modèle B : 1 bouton



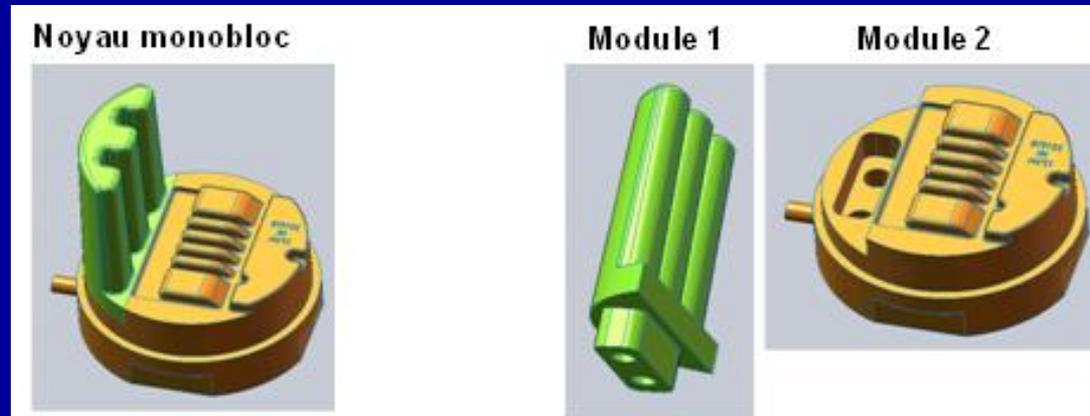
Module pour variante B

Module pour variante A

Module de base

● Définition et exemples

- ~~Outillage monobloc~~ *Outillage modulaire hybride*
- Aspect modulaire
 - Prend en compte les variantes de la pièce à obtenir
 - Permet une réalisation plus rapide et moins coûteuse



Durée de
fabrication

Coûts de
fabrication



Définition et exemples

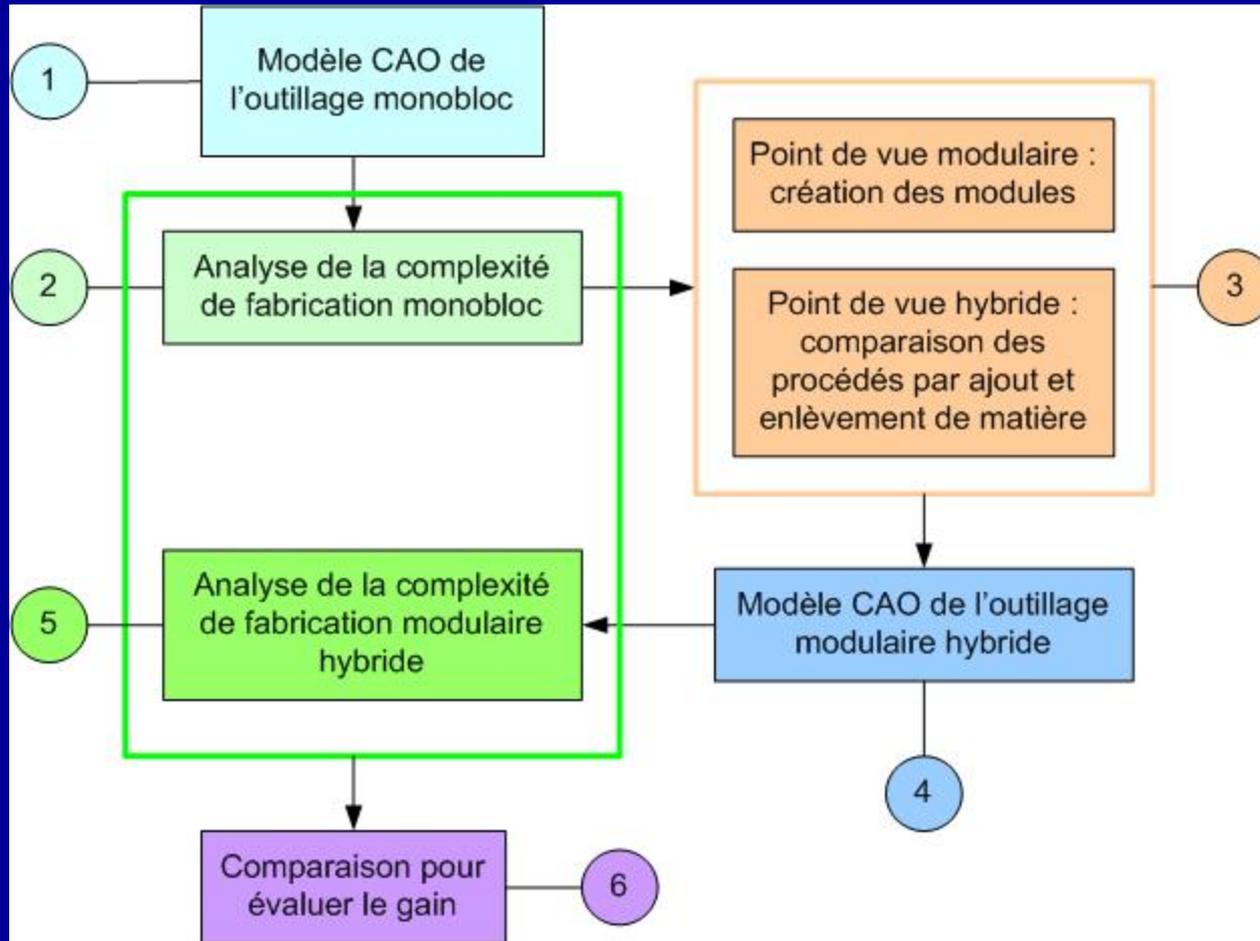
- ~~Outillage monobloc~~ *Outillage modulaire hybride*
- Aspect modulaire
 - Prend en compte les variantes de la pièce à obtenir
 - Permet une réalisation plus rapide et moins coûteuse
- Aspect hybride
 - Procédés de fabrication \neq pour les \neq modules
 - Choix entre enlèvement de matière (UGV) et ajout de matière
 - Possibilité de déposer de la matière directement sur une base usinée (limite les assemblages)



Problématique

- Choix raisonné entre monobloc et modulaire hybride dès la conception

Méthodologie de choix, basée sur l'analyse de la complexité de fabrication.



● Définition de la complexité de fabrication

- La complexité de fabrication d'un outillage est évaluée à partir des paramètres de conception (géométriques, dimensionnels, matériau, spécifications) qui influencent le temps, le coût ou la qualité de réalisation de l'outillage pour un procédé de fabrication donné.

● Paramètres à prendre en compte

– Morphologiques

- Dimensions maximales et minimales
- Rapport d'élanement

- Accessibilité pour l'outil
- Rayon de courbure
- Surfaces en dépouille
- Surfaces complexes
- Volume du brut (englobant)
- Etc.

Procédé par enlèvement de matière

- Volume
- Hauteur
- Orientations des surfaces
- Distance par rapport au centre de la zone de fabrication
- Surfaces de peau
- Etc.

Procédé par ajout de matière

● Définition de la complexité de fabrication

- La complexité de fabrication d'un outillage est évaluée à partir des paramètres de conception (géométriques, dimensionnels, matériau, spécifications) qui influencent le temps, le coût ou la qualité de réalisation de l'outillage pour un procédé de fabrication donné.

● Paramètres à prendre en compte

- Morphologiques
- Matériaux
- Spécifications

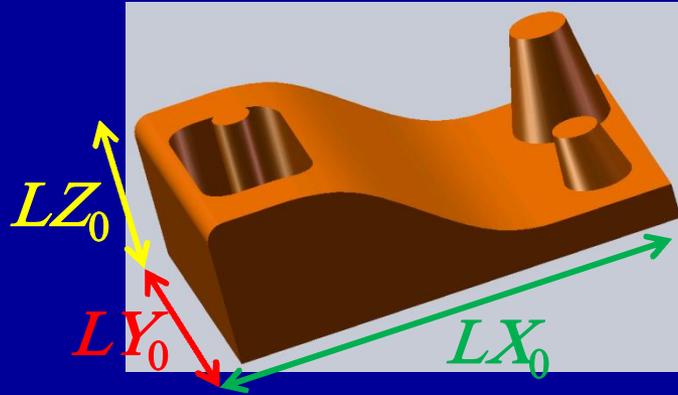
● Deux types d'analyses : globale et locale

- Analyse globale : concerne l'outillage dans son ensemble
 - Ex : le volume
- Analyse locale : calculé pour chaque zone de l'outillage
 - Ex : le rayon de courbure d'une surface

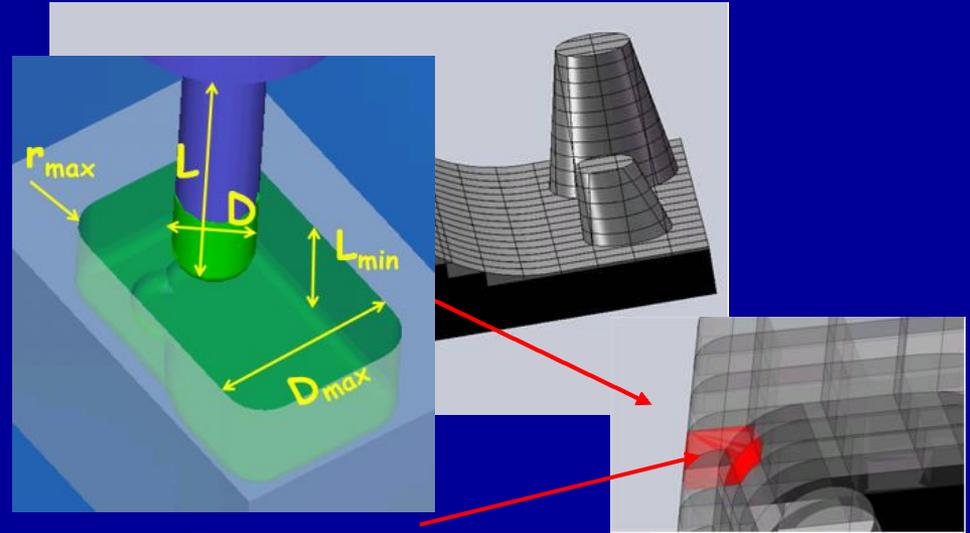
*Indices
globaux*

*Indices
locaux*

Analyse globale de l'outillage



Analyse locale de l'outillage



Intersection outillage / octant 3322

$$C(f)_{3322} = \frac{L_{3322}}{D_{3322}}$$

LX_0 = dimension maxi de l'outillage dans la direction X,
 LX_{max} = course de l'axe X de la machine

| | | |
|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| $C(d_x) = \frac{LX_0}{LX_{max}}$ | $C(d_y) = \frac{LY_0}{LY_{max}}$ | $C(d_z) = \frac{LZ_0}{LZ_{max}}$ |
|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|

- Un faible rayon de courbure d'une surface concave limite le diamètre de la fraise
- L'espace entre deux surfaces limite également le diamètre de la fraise

$C(i) \nearrow \Rightarrow$ Complexité de fabrication \nearrow

Indices de complexité de fabrication par usinage

| <u>Indice</u> | <u>Lié à</u> | <u>Calcul</u> | <u>Type</u> |
|----------------------------------|--------------------------|---|-------------|
| $C(d_x)$ $C(d_y)$ $C(d_z)$ | Dimensions maximales | $C(d_x) = \frac{LX_0}{LX_{\max}}$ $C(d_y) = \dots$ $C(d_z) = \dots$ | Global |
| $C(f)$ | Flexibilité de la fraise | $C(f) = \frac{L}{D}$ | Local |
| $C(b)$ | Volume du brut | $C(b) = LX_0 \times LY_0 \times LZ_0$ | Global |
| $C(c)$ | Quantité de copeaux | $C(c) = \frac{LX_0 \times LY_0 \times LZ_0}{V}$ | Global |

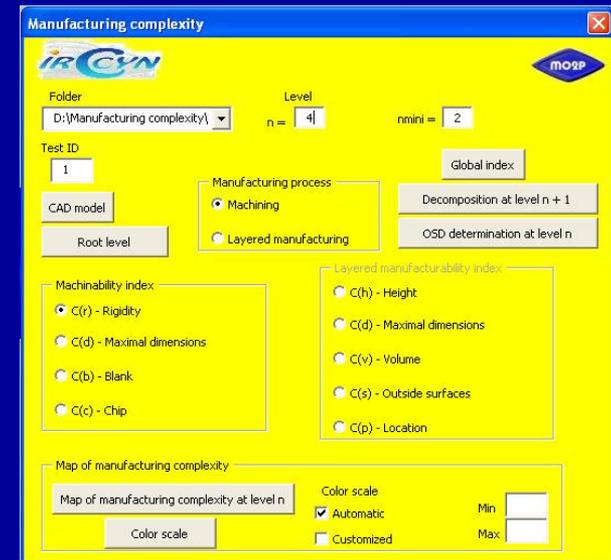
● Indices de complexité de fabrication par usinage

● Indice de complexité de fabrication par ajout de matière

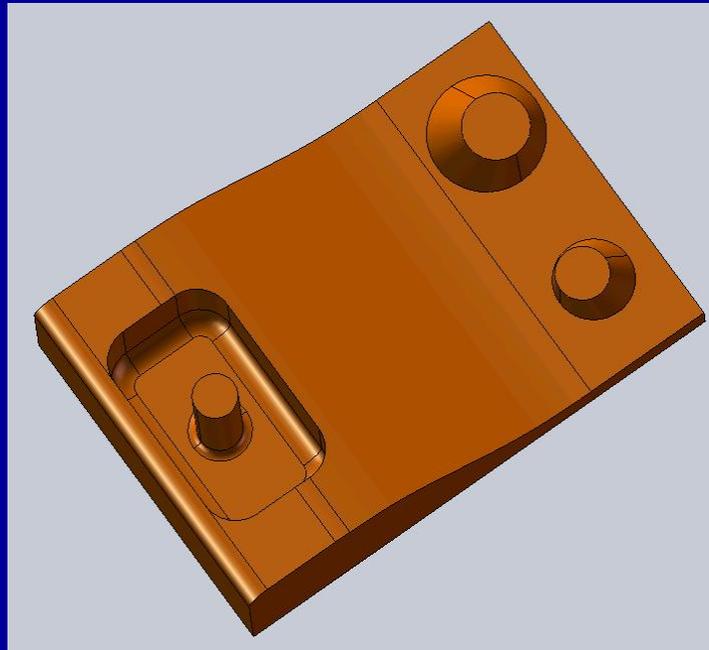
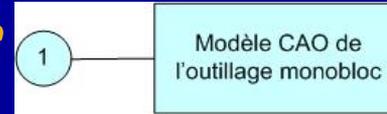
| <u>Indice</u> | <u>Lié à</u> | <u>Calcul</u> | <u>Type</u> |
|----------------------------------|---------------------------------------|---|---------------|
| $C(d_x)$ $C(d_y)$ $C(d_z)$ | Dimensions maximales | $C(d_x) = \frac{LX_0}{LX_{\max}}$ $C(d_y) = \dots$ $C(d_z) = \dots$ | Global |
| $C(v)$ | Volume | $C(v) = V$ | Global |
| $C(s)$ | Surface de peau | $C(s) = S_{ext}$ | Global |
| $C(h)$ | Hauteur | $C(h) = z - Z_0$ | Local |
| $C(\rho)$ | Distance par rapport au centre | $C(\rho) = \sqrt{(x - X_0)^2 + (y - Y_0)^2}$ | Local |

Utilisation de la méthodologie

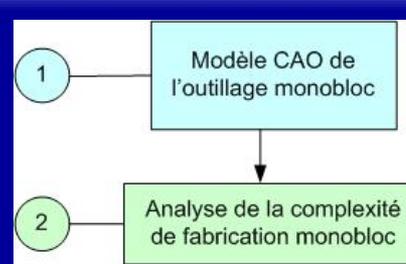
- Développement d'une interface de calcul des indices de complexité de fabrication sous SolidWorks
- L'objectif est de diminuer la complexité de fabrication d'une pièce, en appliquant les aspects modulaires hybrides
- Deux possibilités d'utilisation :
 - mono-procédé (modulaire)
 - multi-procédé (modulaire hybride)



● 1^{er} exemple : approche modulaire
(un seul procédé de fabrication)



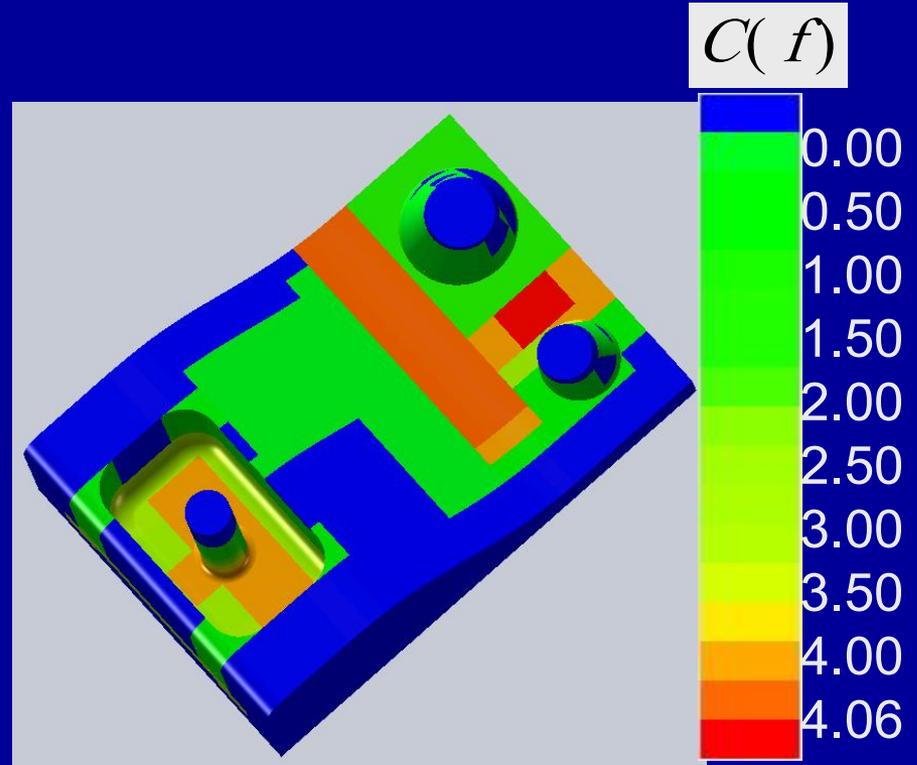
1^{er} exemple : approche modulaire (un seul procédé de fabrication)



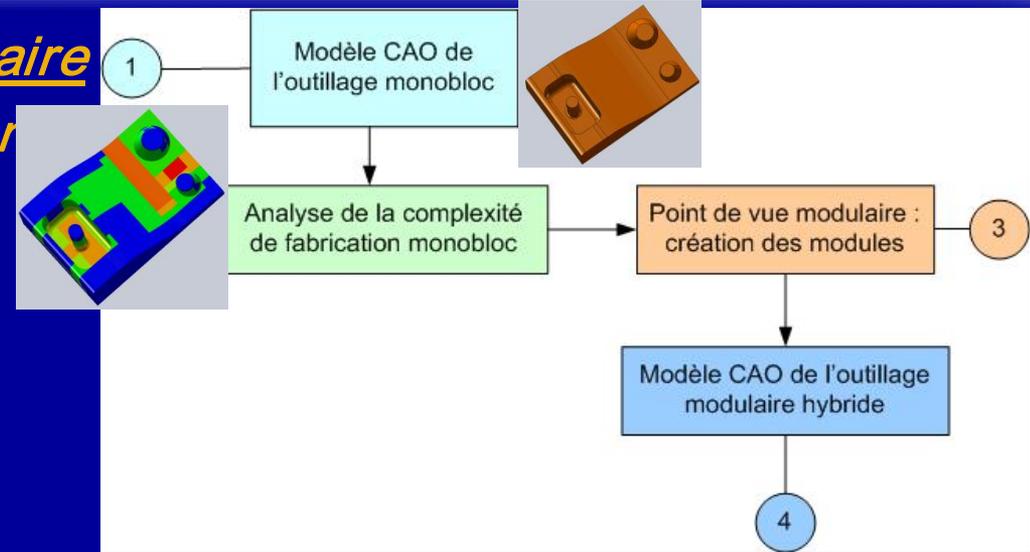
Machining complexity indexes

| Global indexes | | Local indexes | |
|----------------|--------|---------------|------|
| C(dx) | 0.185 | C(f)max | 4.06 |
| C(dy) | 0.133 | C(f)moy | 1.70 |
| C(dz) | 0.1 | | |
| C(b) | 480000 | | |
| C(c) | 2.35 | | |

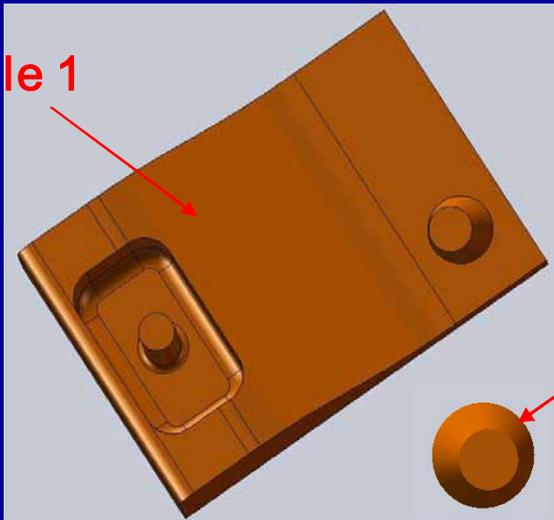
OK



1^{er} exemple : approche modulaire
(un seul procédé de fabrication)

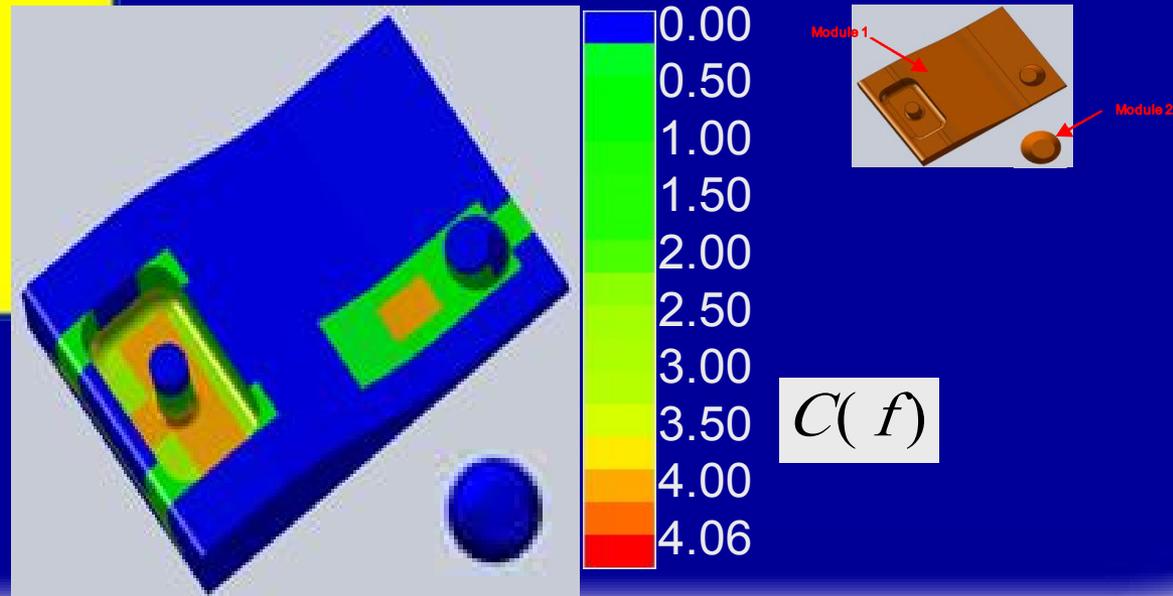
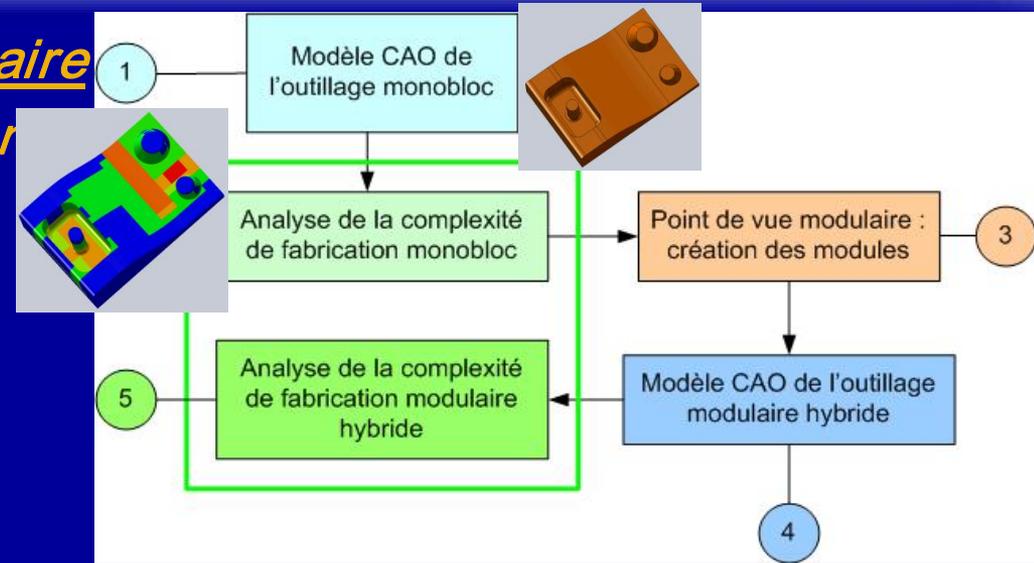
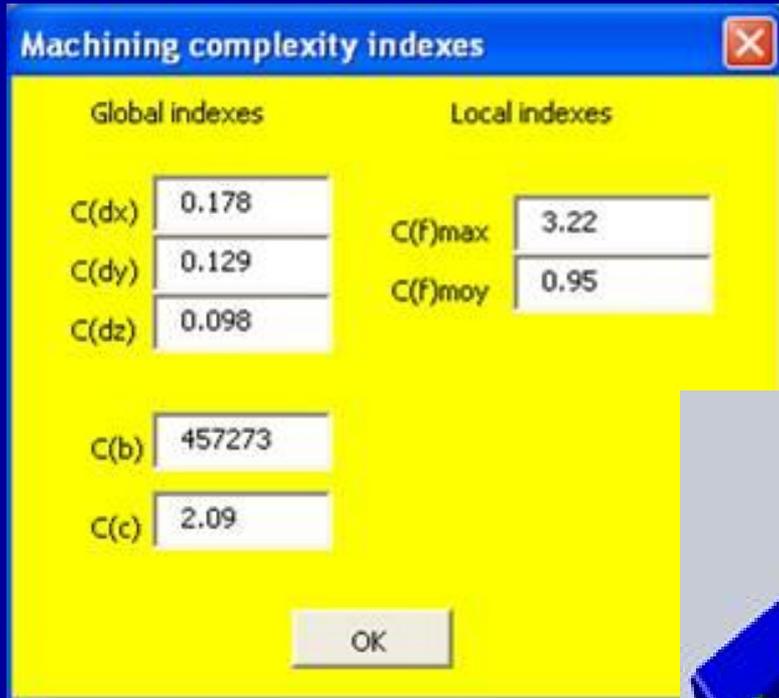


Module 1

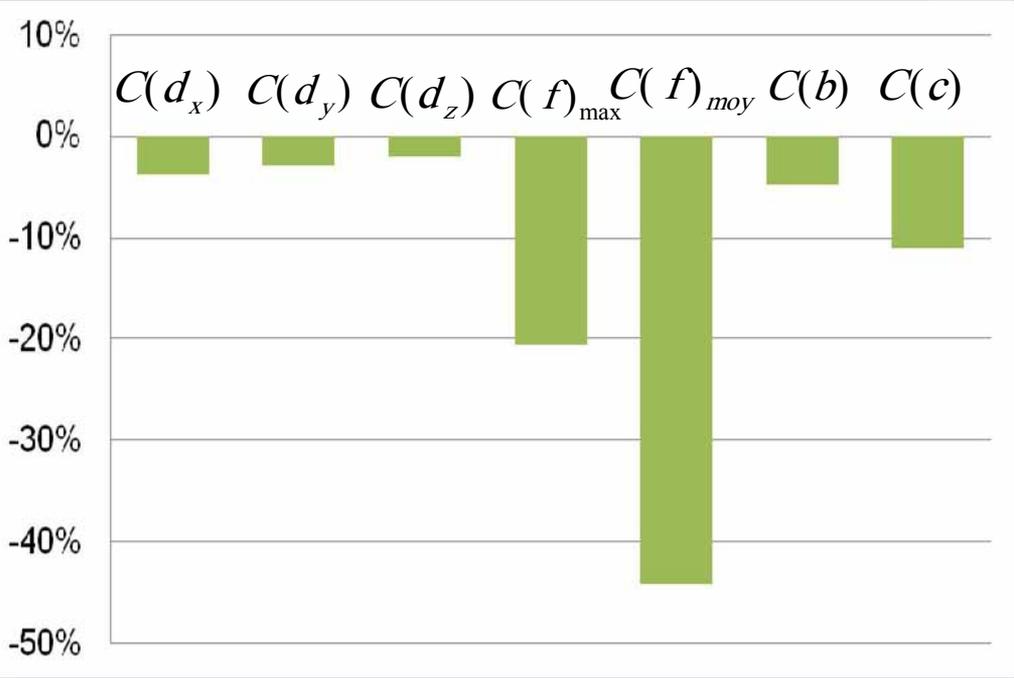
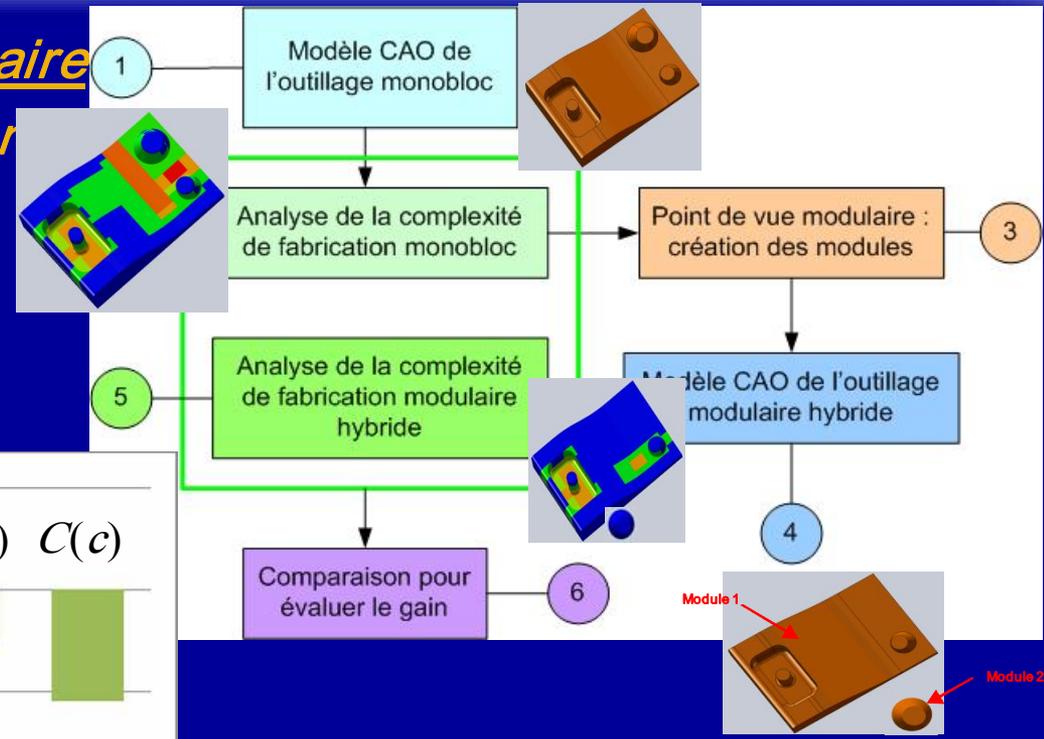


Module 2

1^{er} exemple : approche modulaire (un seul procédé de fabrication)

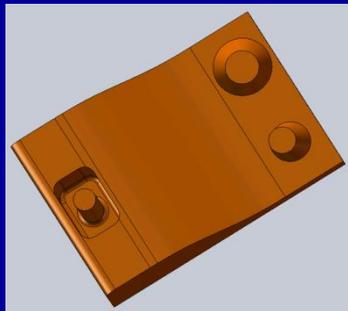


1^{er} exemple : approche modulaire (un seul procédé de fabrication)



1^{er} exemple : approche modulaire

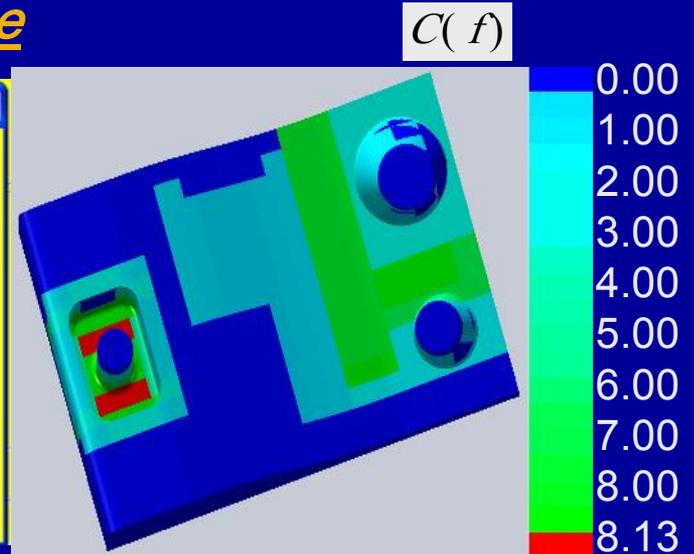
2^{ème} exemple : approche modulaire hybride



Machining complexity indexes

| Global indexes | | Local indexes | |
|----------------|--------|---------------|------|
| C(dx) | 0.185 | C(f)max | 8.13 |
| C(dy) | 0.133 | C(f)moy | 1.65 |
| C(dz) | 0.1 | | |
| C(b) | 480000 | | |
| C(c) | 2.09 | | |

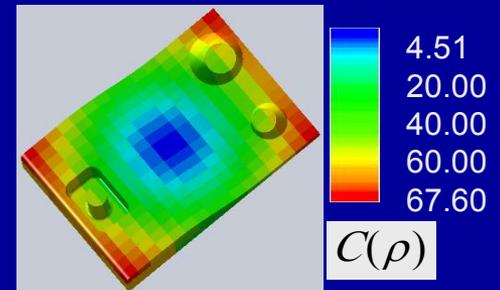
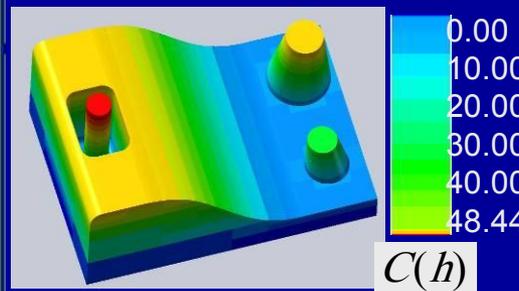
OK



Layered manufacturing complexity indexes

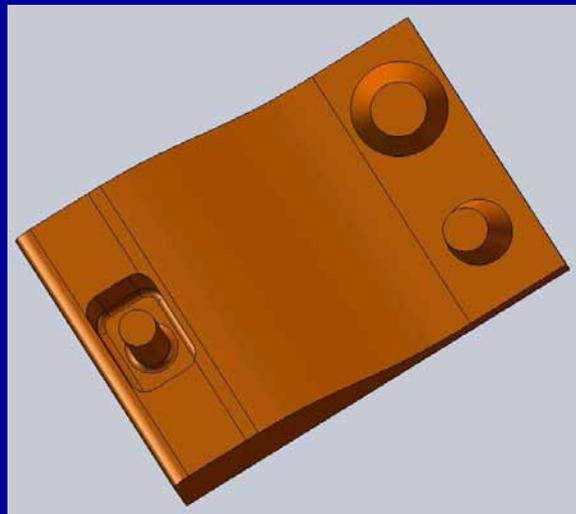
| Global indexes | | Local indexes | |
|----------------|--------|---------------|-------|
| C(dx) | 0.48 | C(h)max | 48.44 |
| C(dy) | 0.32 | C(h)moy | 15.26 |
| C(dz) | 0.28 | | |
| C(v) | 229177 | C(p)max | 67.60 |
| C(s) | 35557 | C(p)moy | 39.04 |

OK

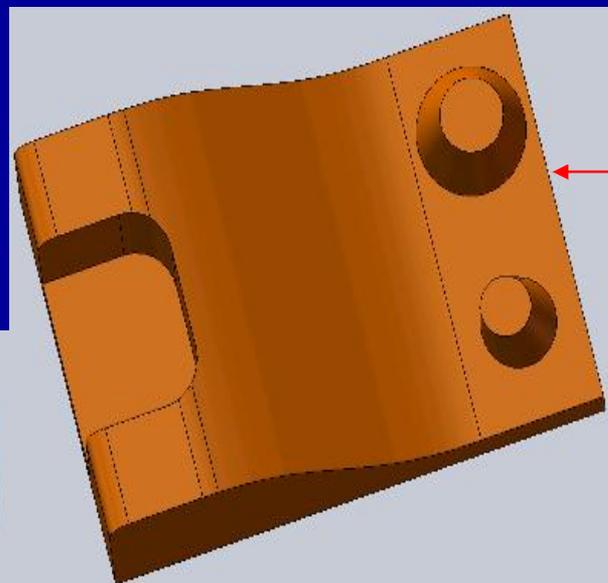
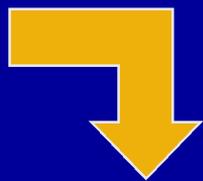
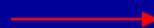


1^{er} exemple : approche modulaire

2^{ème} exemple : approche modulaire hybride



Module 1,
réalisé par
ajout de
matière

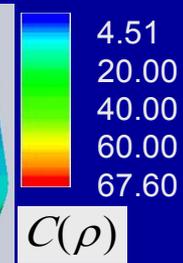
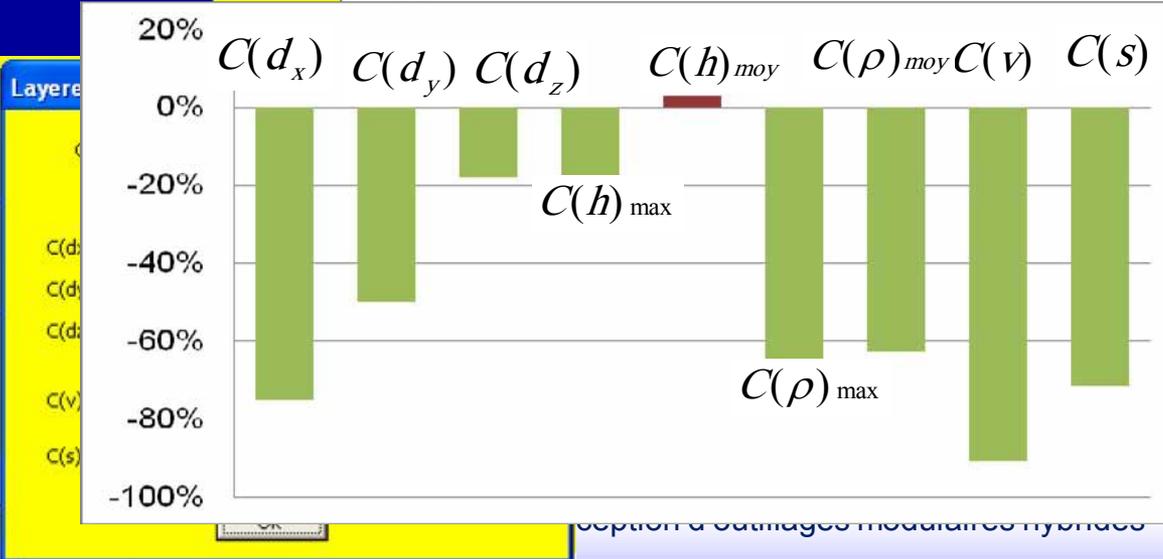
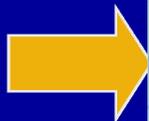
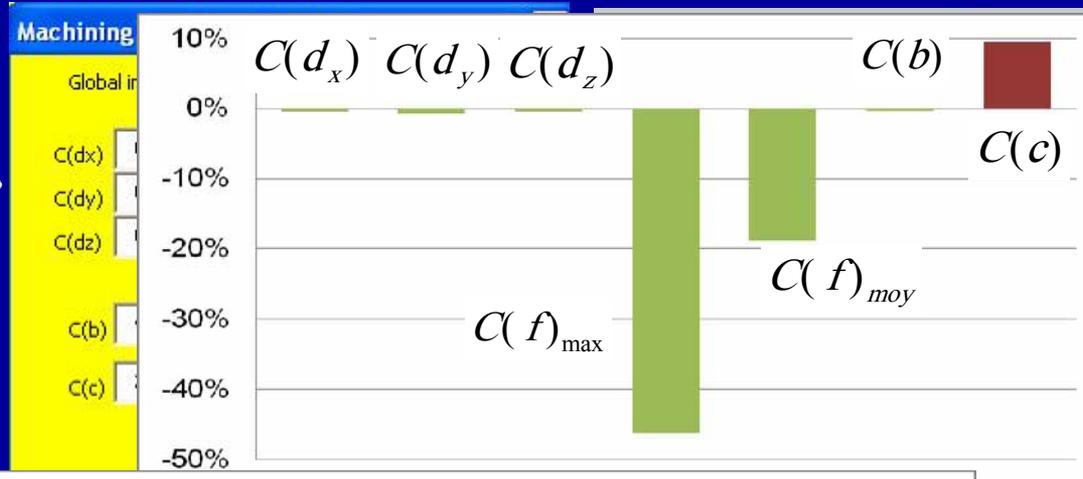
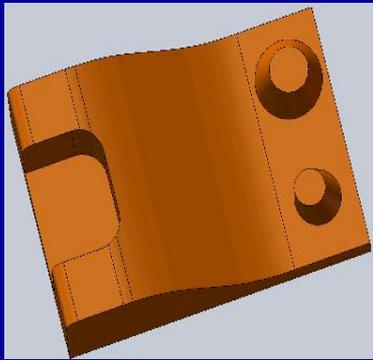


Module 2,
réalisé par
enlèvement de
matière

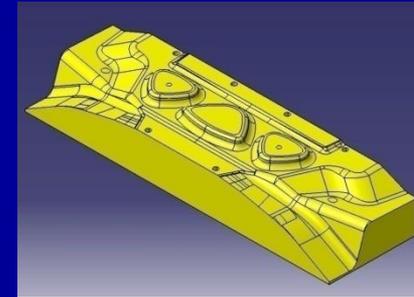
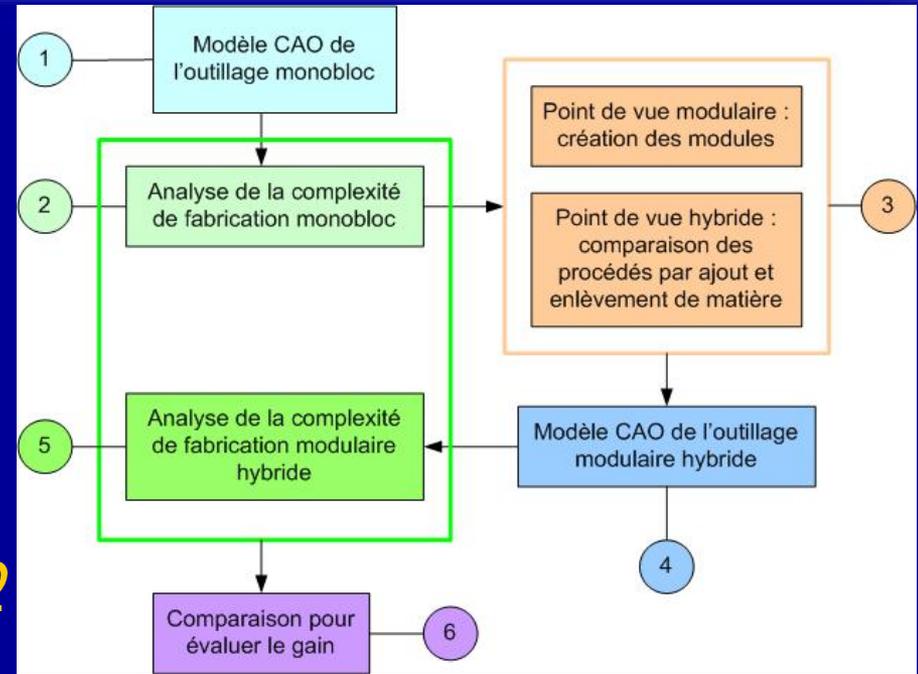


1^{er} exemple : approche modulaire

2^{ème} exemple : approche modulaire hybride



- Méthodologie de conception d'outillages modulaires hybrides
- Analyses de complexité de fabrication globale et locale (décomposition en octree)
- Indices calculés à partir de la CAO
- Développement d'autres indices
- Comparaison des indices
- Application à un outillage PSA



Méthodes
de fab
(stratégies,
support)

Intégration
CFAO

Comparaison
avec
l'usinage

Procédés de
fabrication par
ajout de matière

...

Optimisation
des
paramètres
opératoires

Applications à
d'autres
domaines
(médical, ...)