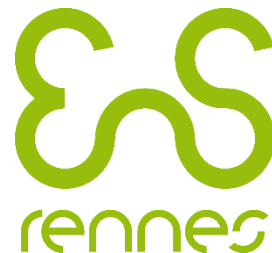


Vers une maîtrise de la fabrication innovante et durable

Olivier KERBRAT

Maitre de conférences ENS Rennes



4

Vers une maîtrise

de la fabrication innovante et durable

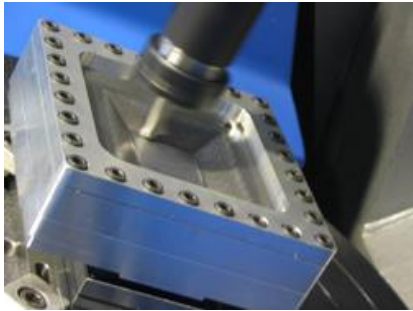
1

2

3

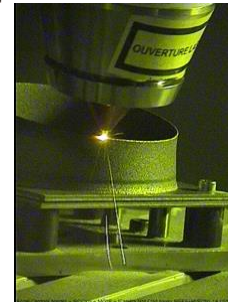
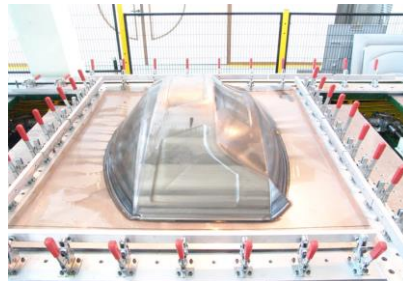
Equipe Modélisation et Optimisation des Process de Production

*Proposition, compréhension, modélisation
et diffusion des procédés de fabrication novateurs*



Usinage grande vitesse
Formage incrémental
Robotique manufacturière
Fabrication additive
Polissage laser

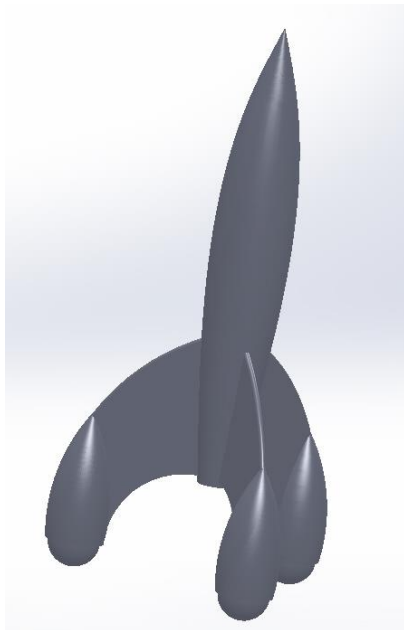
...



La fabrication additive

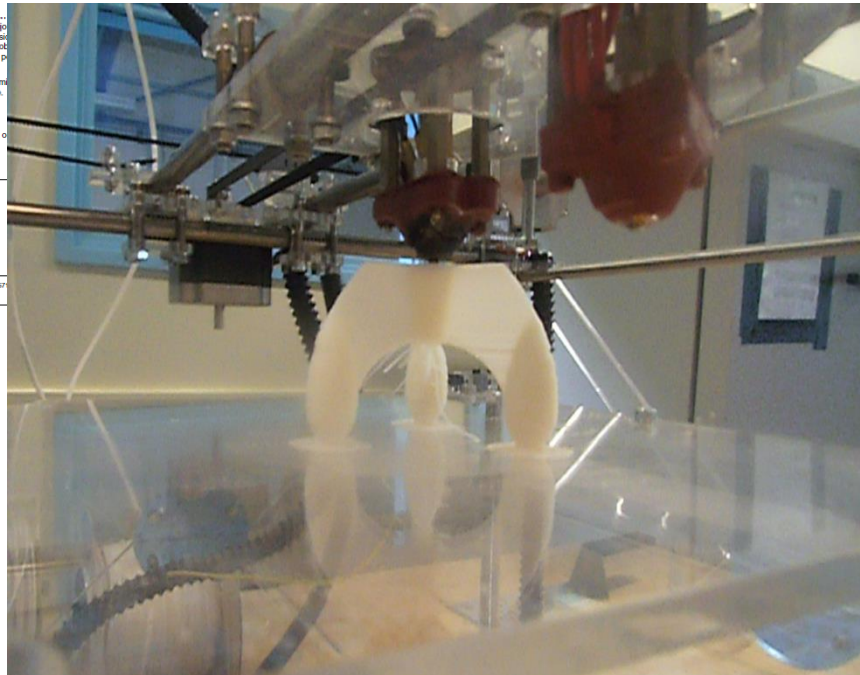
« La fabrication additive est l'ensemble des procédés permettant de fabriquer, **couche par couche**, par ajout de matière, un **objet physique** à partir d'un **objet numérique**. »

Objet numérique
= fichier CAO

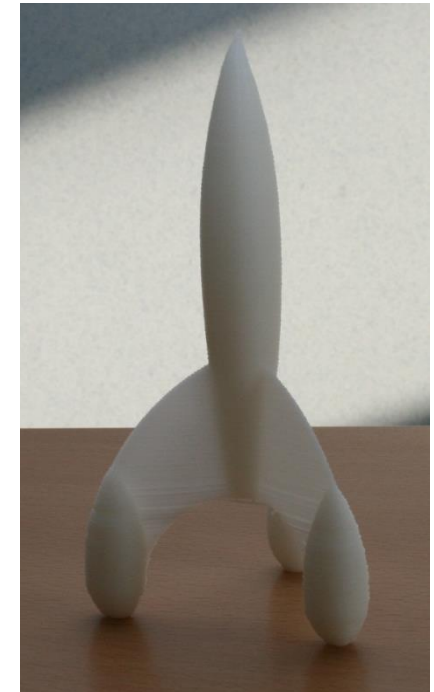


FAT72165	ISSN 0335-9921
norme française	NF E 67-001
	Octobre 2011
	Indice de classement : E 67-001
	ICS : 01.040.25 ; 25.120.99
Fabrication additive	
Vocabulaire	
E : Additive manufacturing — Vocabulary	
D : Generative Fertigungsverfahren — Terminologie	
	011 pour prendre effet
	travaux de normalisation

Fabrication couche par couche



Objet physique



2 – Fabrication additive – Avantages, Inconvénients, Verrous



Matière utilisée
Taille des séries
Possibilités de conception
(géométries internes – externes complexes)

Un procédé jeune



Coûts relativement élevés
Normalisation partiellement achevée

Méconnaissance des procédés :

- **Opportunités**
- **Spécificités et contraintes**

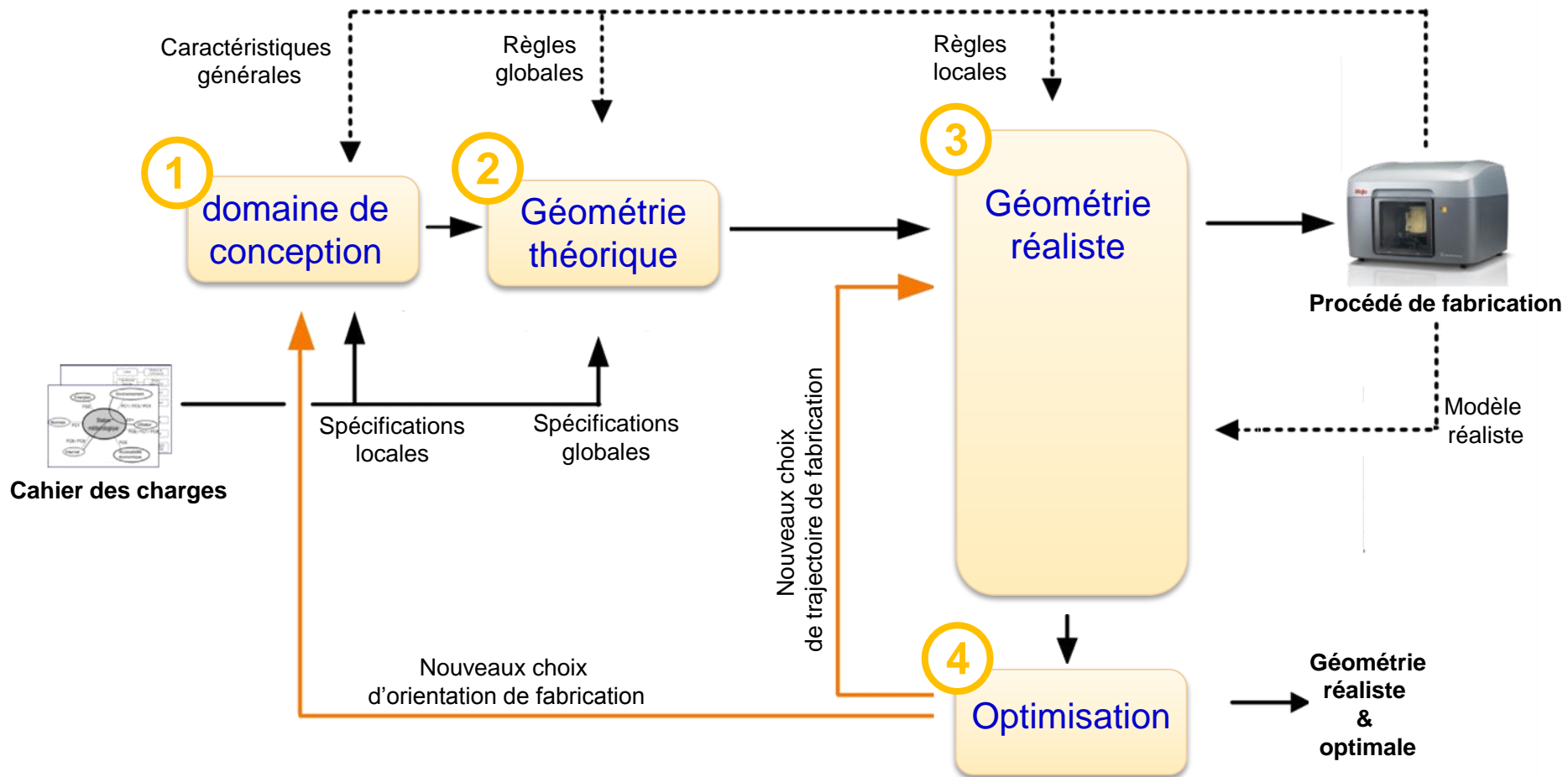


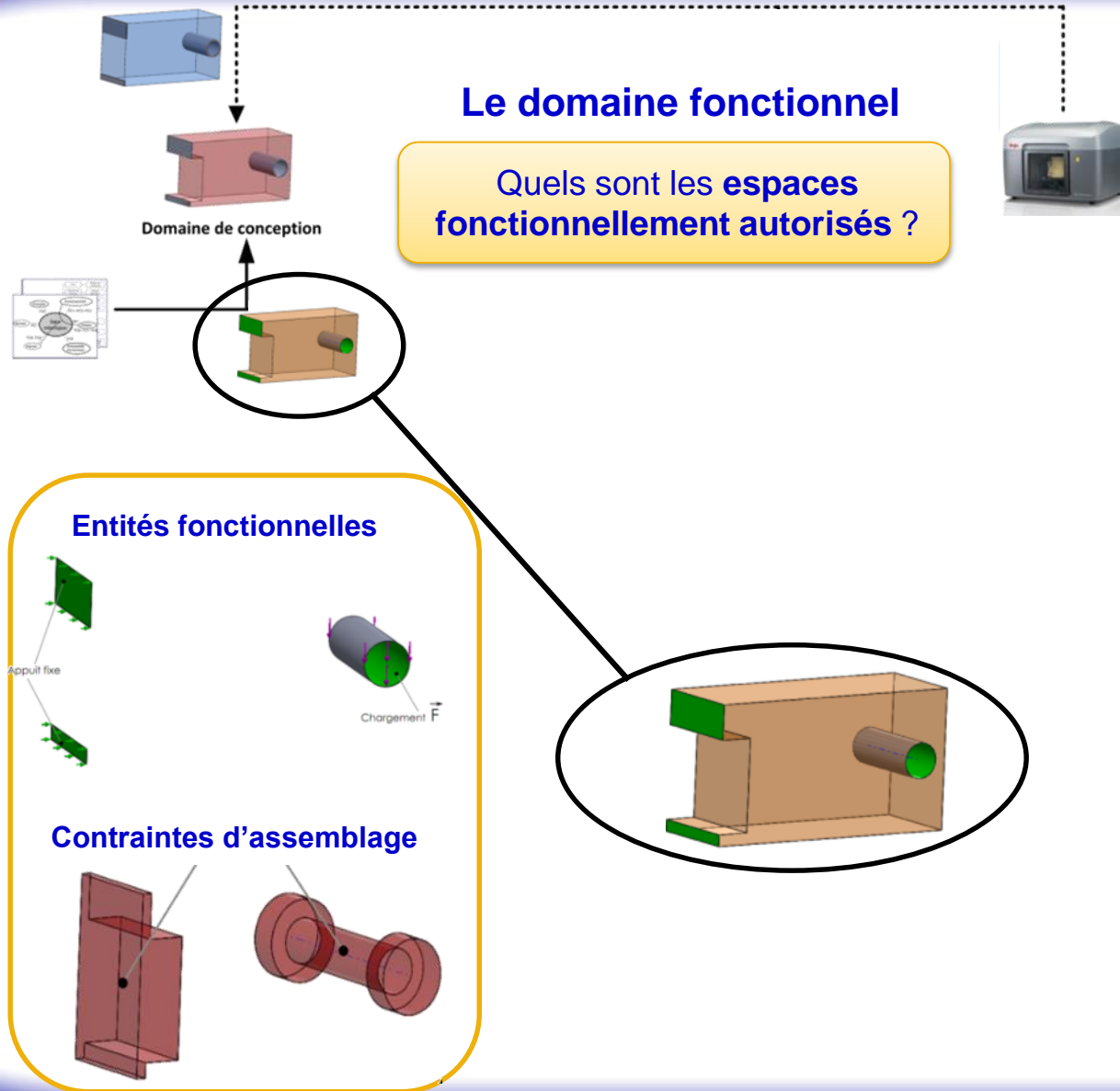
1760: 1^{ère} machine d'usinage

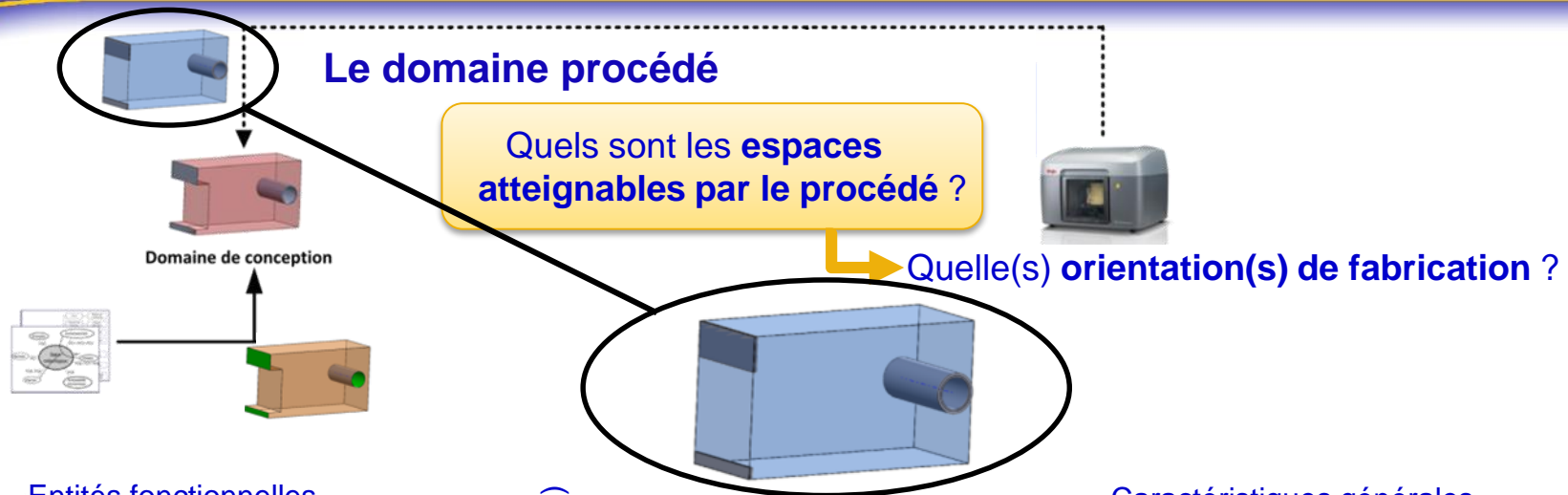


1986 : 1^{ère} machine de fabrication additive

Comment concevoir les produits pour tirer profit des opportunités de cette technologie de fabrication ?



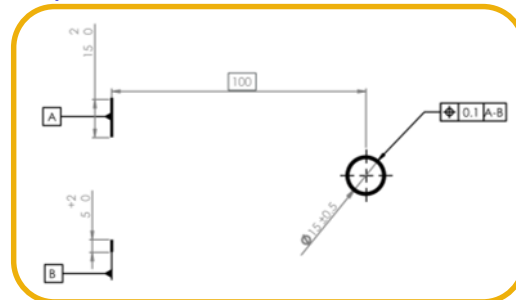




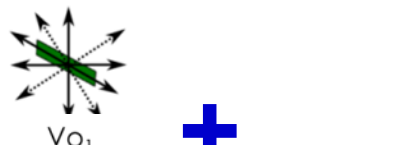
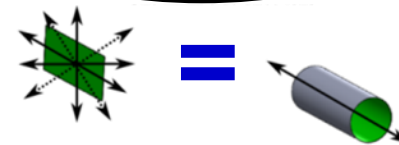
Entités fonctionnelles



Spécifications fonctionnelles locales

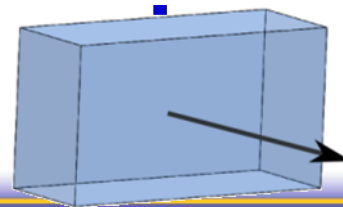


Choix d'orientation(s) de fabrication



Volumes obligatoires

Volumes accessibles



Caractéristiques générales

- Dimensions de l'espace de travail : 140x140x140 mm³
- Cinématique : 3 axes positionnés
- Porte-à-faux maximal : 0°

Capabilité des procédés

- $\Delta l(z) = \pm 0,15$ mm
- $\Delta l(x) = \Delta l(y) = \pm 0,15$ mm
- $d_{\text{mini}}(z) = 0,18$ mm
- $d_{\text{mini}}(x) = d_{\text{mini}}(y) = 0,21$ mm
- $e_{\text{parachèvement}} = 0,2$ mm

Accessibilité

- Contrainte d'accessibilité : \emptyset

Objectif : définir une géométrie optimale vis-à-vis des objectifs globaux

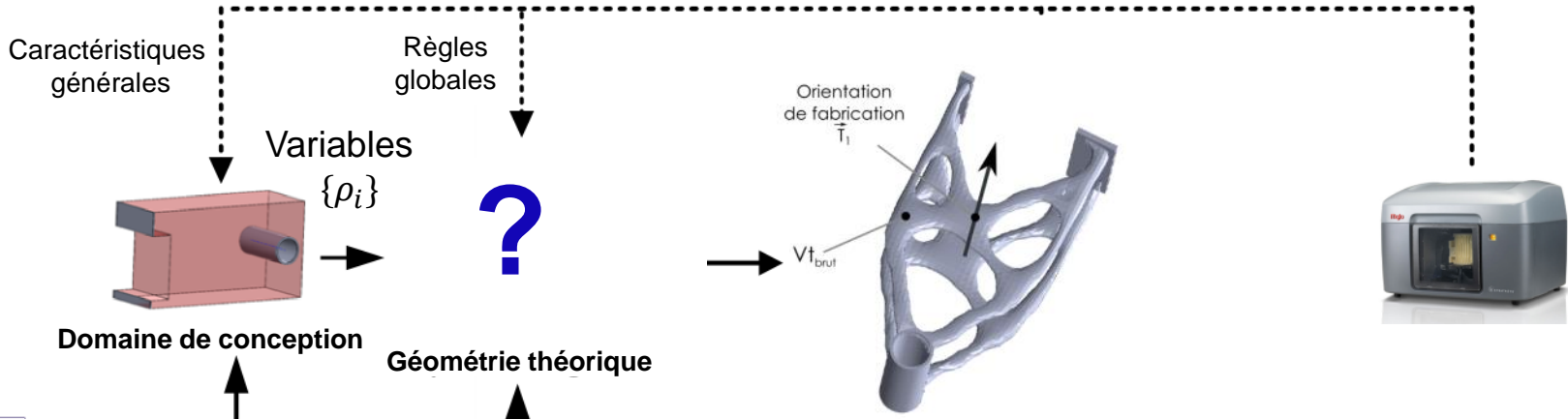
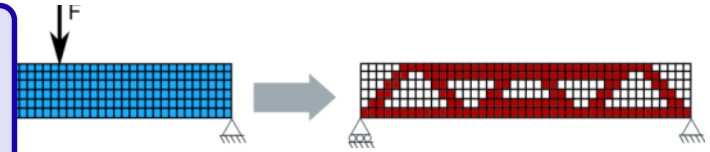
Optimisation topologique

- Obtenir une géométrie optimale
- Générer des formes complexes avec les logiciels CAO courants.

Fonction objective 1 :

Minimiser le volume de la pièce :

$$V = \sum_{i=1}^N \rho_i * v$$



Fonction objective 2 :

Minimiser de déplacement sous charge :

$$c(\rho_i) = U^T K U = \sum_{i=1}^N u^T k_i u$$

Avec :

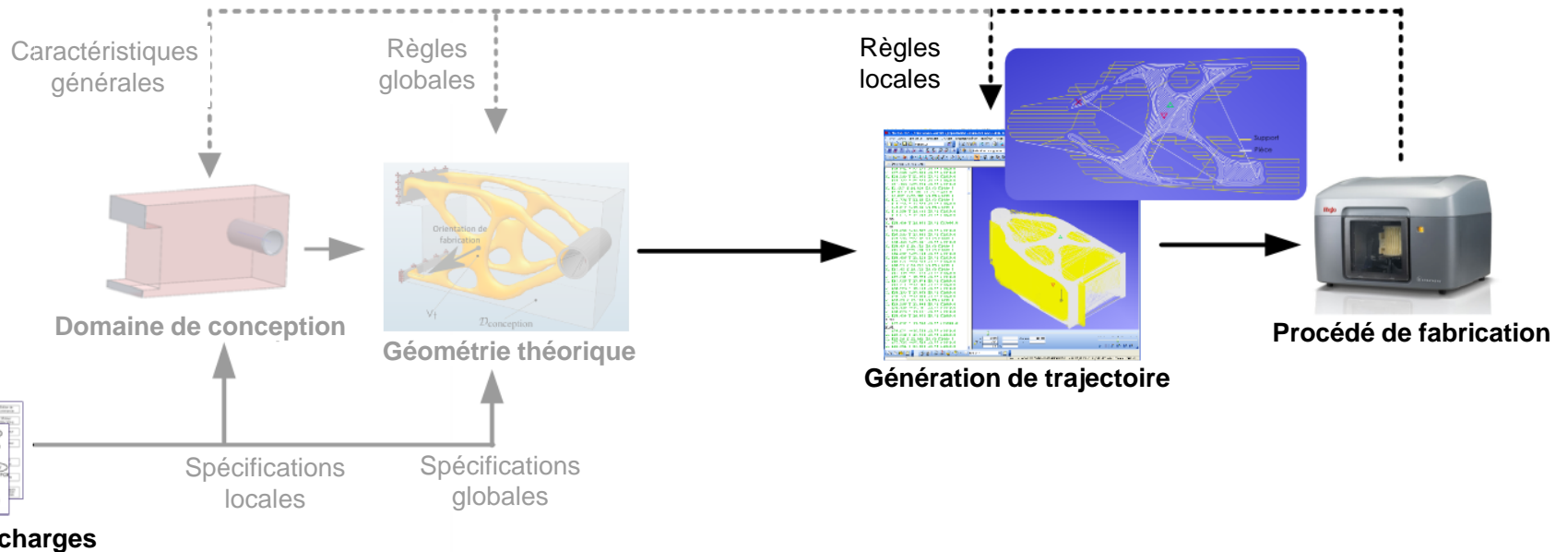
$$k_i = \rho_i^P * E$$

Cahier des charges

Objectif : définir une géométrie réaliste vis-à-vis du procédé

1^{ère} étape : génération de la trajectoire

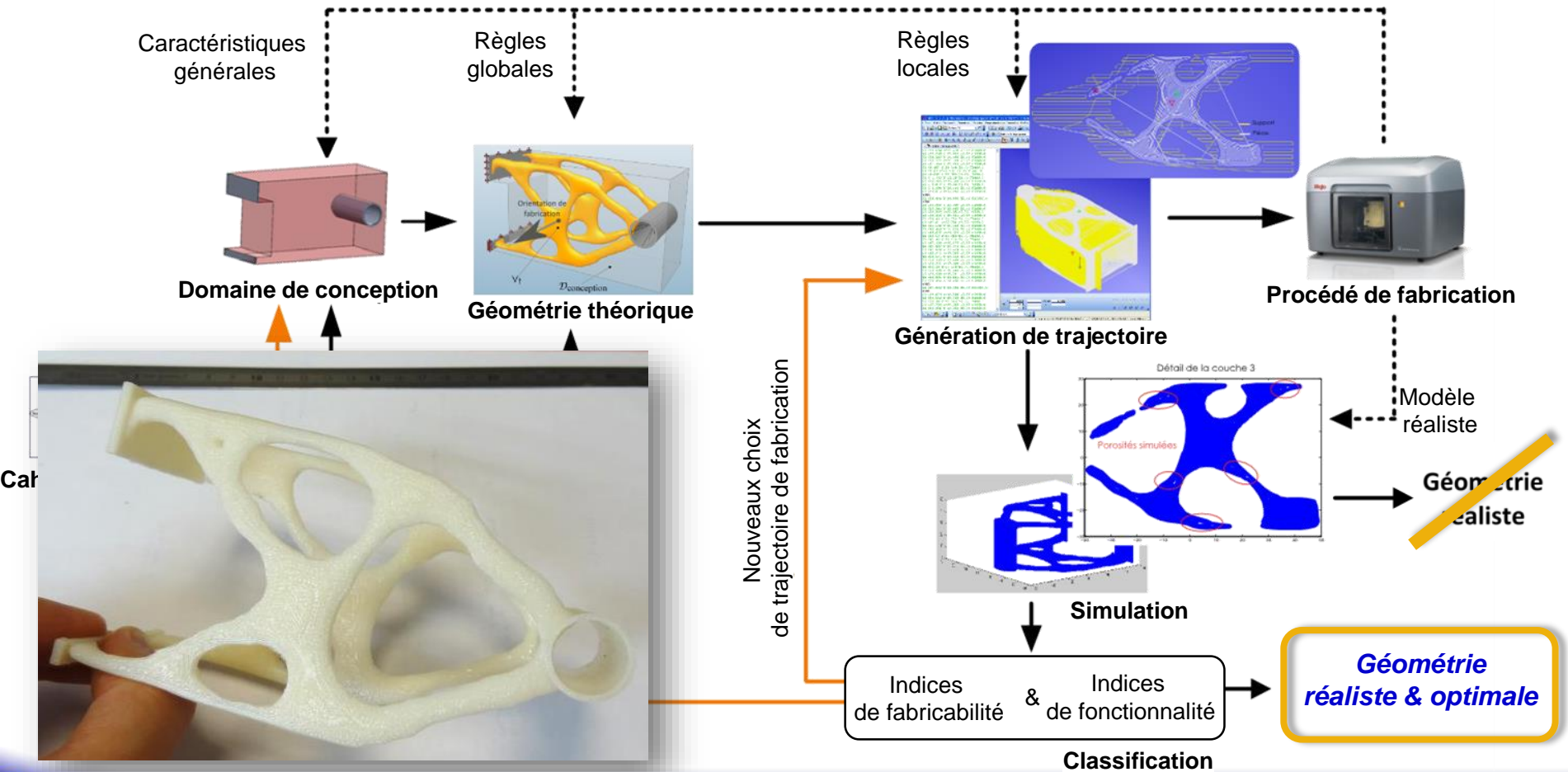
2^{nde} étape : simuler le processus de fabrication



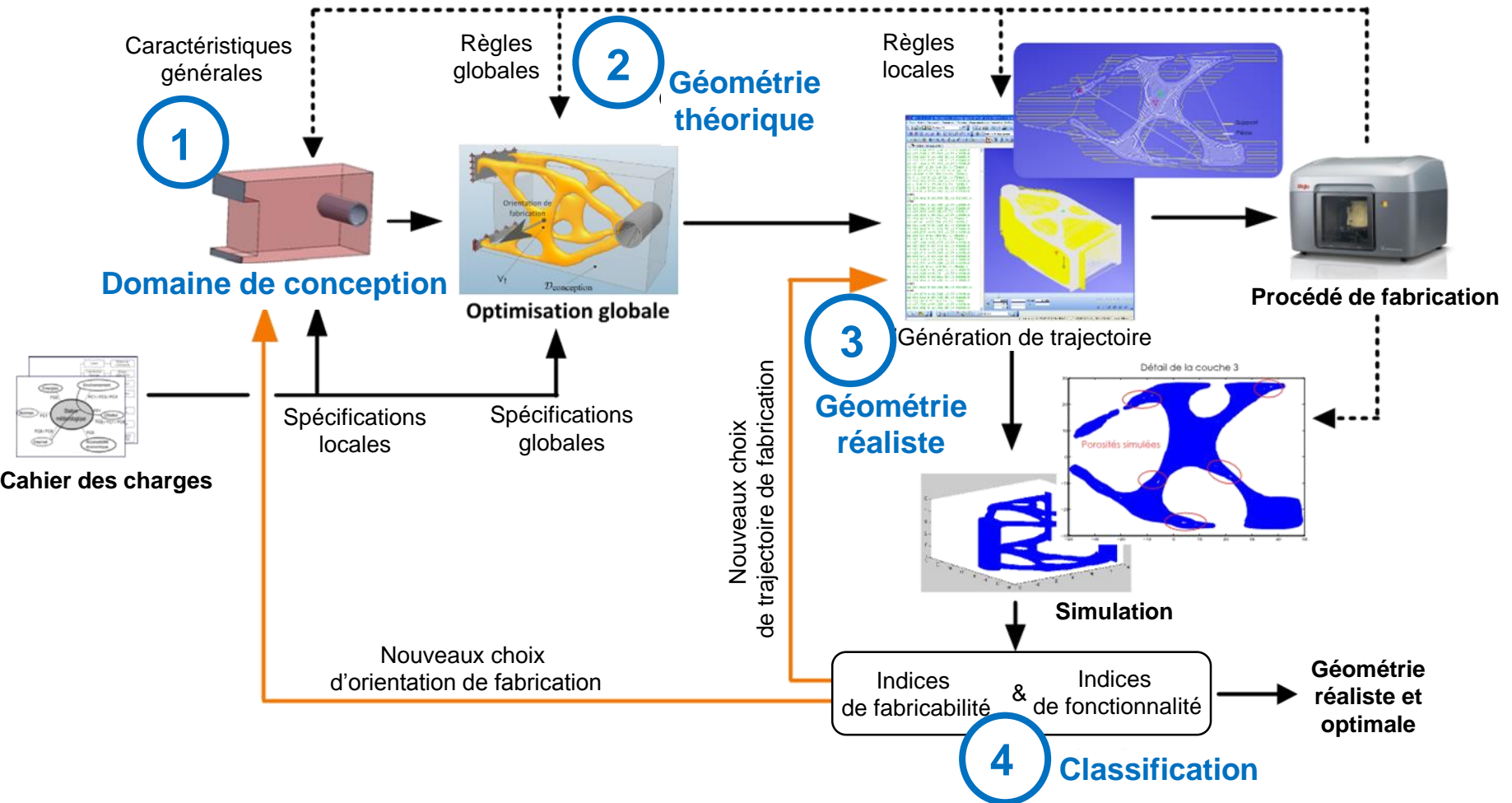
Si différentes stratégies de fabrication sont possibles

Besoin de toutes les tester pour les comparer et les classer.

Objectif : identifier la stratégie de fabrication optimale



Cal



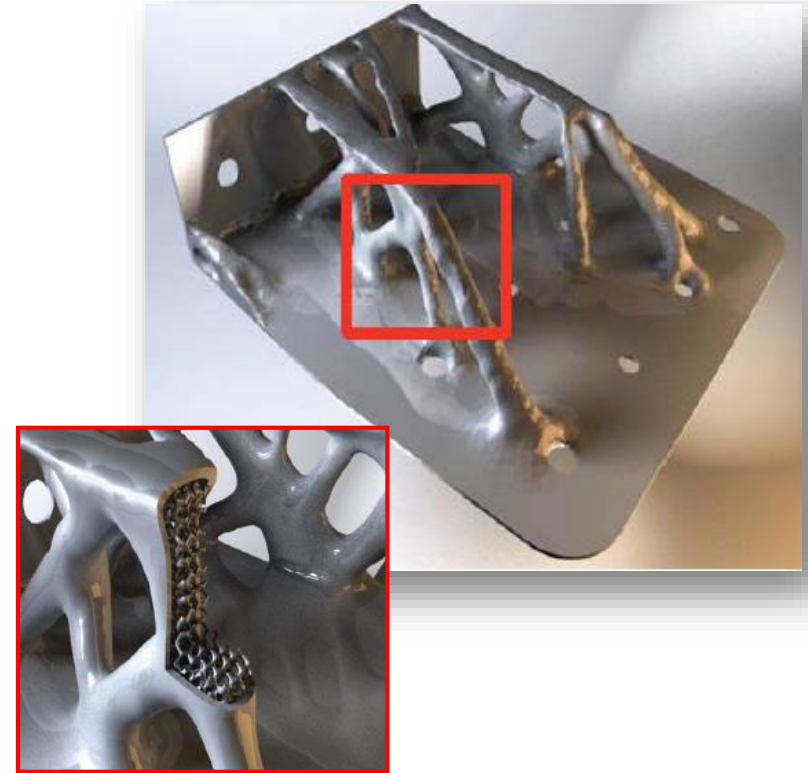
3 – Fabrication innovante et durable

Optimisation topologique

... avec des structures internes complexes !



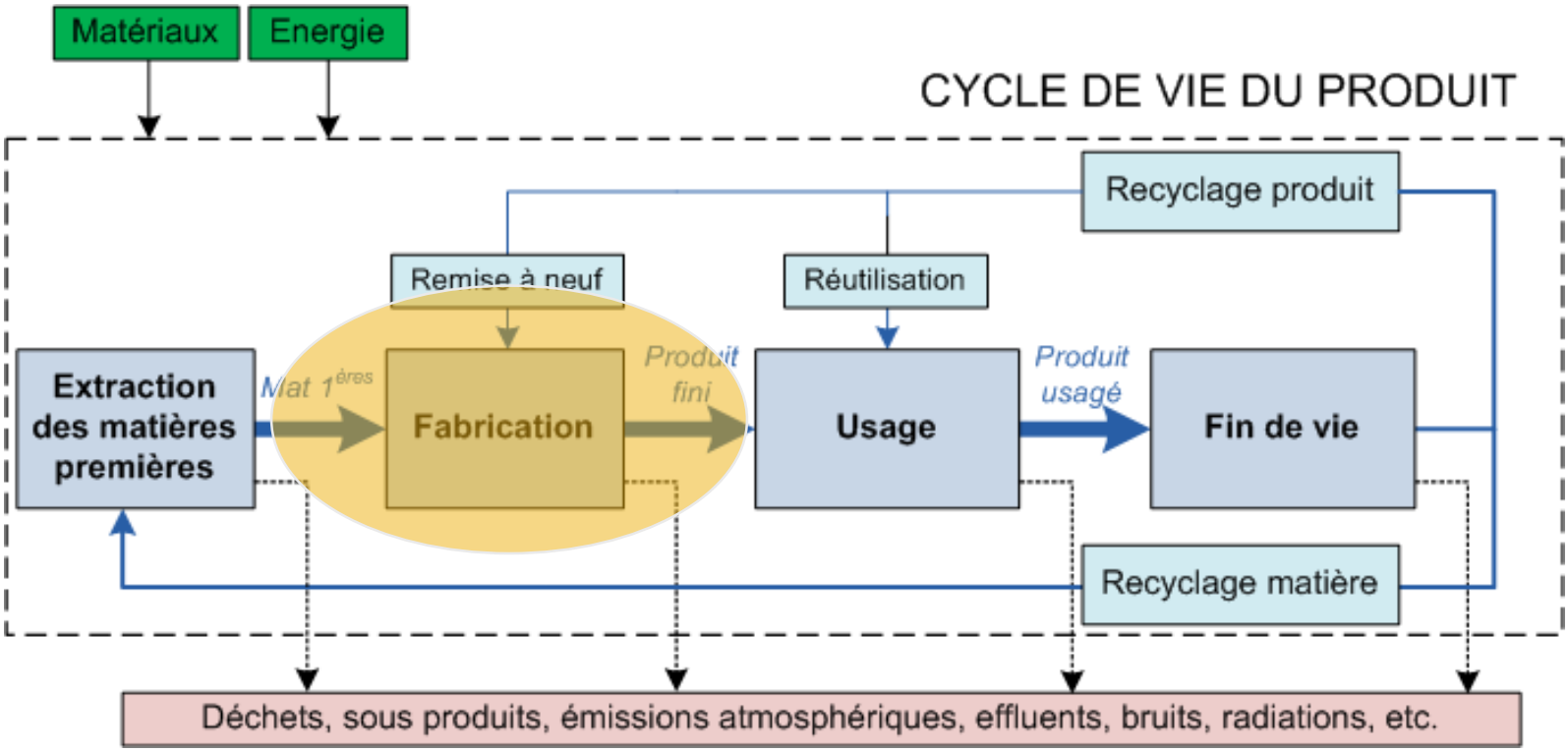
Charnière des capots moteur de l'A380



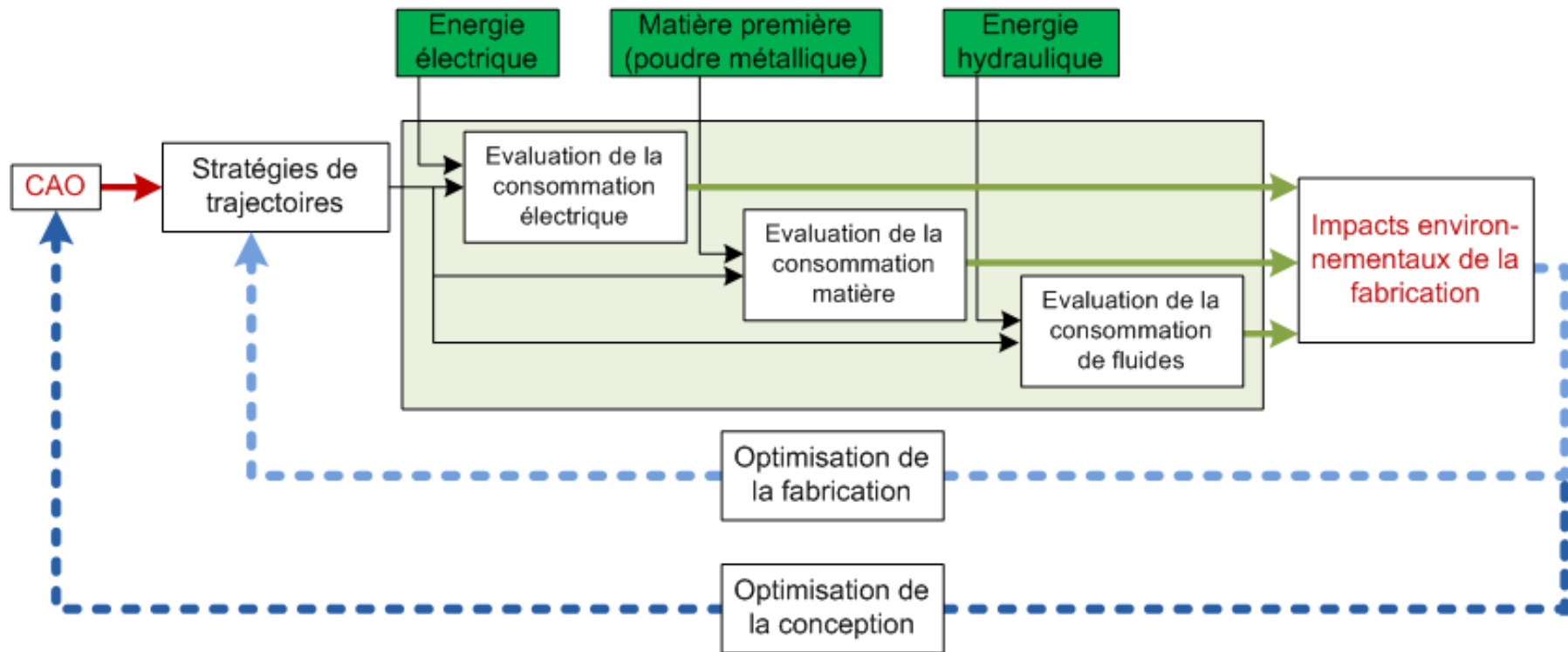
Comment quantifier les impacts environnementaux de pièces fabriquées par cette technologie ?

3 – Fabrication innovante et durable

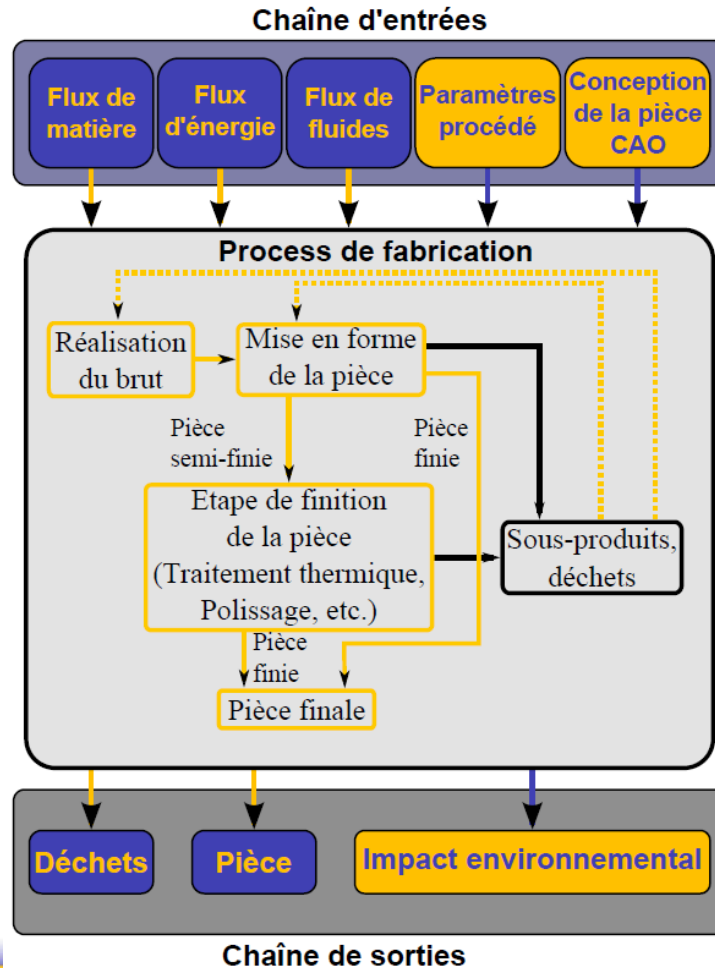
Nécessité de caractériser et comparer les impacts environnementaux tout le long du cycle de vie



**Objectif : de la CAO à l'évaluation de la performance
environnementale du procédé de mise en forme**



Objectif : Modéliser le flux d'énergie et de matière traversant l'ensemble des étapes de fabrication



Connaissance fine de l'ensemble des étapes de fabrication

Caractérisation des consommations et rejets de matière, d'énergie, de fluides

Evaluation des impacts environnementaux

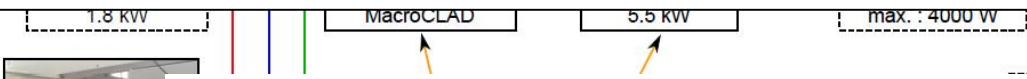
Modèles prédictifs

Fluides (gaz, fluide de refroidissement, etc.)

$$Ee_{axes}^{clad}(p_i, S_i, t_{fab}^{clad}) = \sum_{i=1}^5 \int_0^{t_{fab}^{clad}} Pe_{axes\ i}(C_m, \Omega_m, \eta) * dt \quad (kWh)$$



$$E.I.^{clad} = f_{electricite} * Ee_{electricite}^{clad} + f_{matériau} * m_{poudre\ proj.}^{clad} + f_{gaz} * V_{gaz}^{clad} \quad (mPts)$$



$$m_{poudre\ proj.}^{clad} = [r_b(d_m^{clad}, buse) + k * (1 - r_b(d_m^{clad}, buse))] * \frac{d_m^{clad}}{1000} * \frac{t_{fab}^{clad}}{60} \quad (kg)$$

$$Ee_{laser}^{clad}(P_l, t_{fab}^{clad}) = t_{fab}^{clad} * Pe_{veille\ laser}^{clad} + t_{laser}^{clad} * g(P_l) \quad (kWh)$$

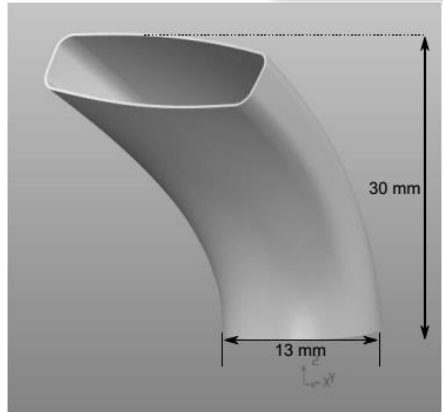


$$Ee_{ref.}^{clad} = (Pe_{ref.-on}^{clad} - Pe_{ref.-veille}^{clad}) * t_{on} + Pe_{ref.-veille}^{clad} * t_{fab}^{clad} \quad (kWh)$$



$$V_{gaz}^{clad} = [d_{gaz\ porteur}^{clad} + d_{gaz\ formeur}^{clad}] * \frac{t_{fab}^{clad}}{60} \quad (l)$$

Objectif : Proposer un outil d'évaluation environnementale de la phase de fabrication utilisable en conception



Choix des conditions de fabrication
Choix de la machine de fabrication

EIA²M
Utilisation de la machine CLAD

Choix de machine
CLAD
Rapman
Mojo
Fraiseuse

Choix de buse
 MacroCLAD
 MesoCLAD

Module(s) : 1
Charger le fichier

Paramètres de fabrication
Débit Poudre Petite 3 g/min
Buse
Débit Poudre Grosse 0 g/min
Buse
Débit Gaz Porteur 2.85 l/min
Débit Gaz Central 1 l/min
Débit Gaz Intérieur 3.5 l/min
Puissance laser 244 Watt
Vitesse hors matière 5000 mm/min
Vitesse approche 800 mm/min
Vitesse de travail 800 mm/min

3D visualization of the nozzle with axes: Axe z (0-50), Axe y (0-10), Axe x (-10-10).
Buttons: Prev., Close

EIA²M - Resultats

Consommation électrique
Consommation des axes 0.003 kWh
Consommation du laser 0.09 kWh
Consommation du refroidisseur 0.5 kWh
Consommation constante 0.6 kWh
Consommation totale 1.20 kWh

Impact environnemental
I.E. électricité 14 mPts
I.E. poudre 2 mPts
I.E. gaz 0 mPts
I.E. TOTAL: 16 mPts

Consommation de matière
Poudre fusionnée 13 grammes
Poudre perdue 13 grammes

Consommation de gaz
Gaz porteur 25 litres
Gaz conformeur 40 litres

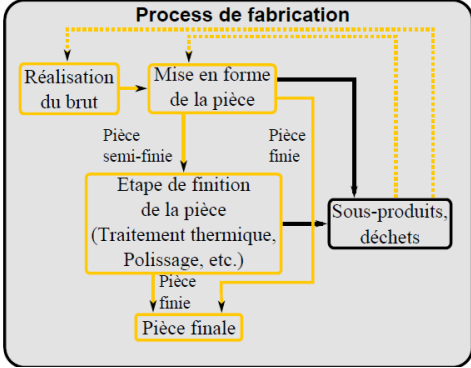
Autres valeurs
Durée de fabrication 532 secondes

Part relative
Electricité 88 %
Poudre 12 %
Gaz 0 %

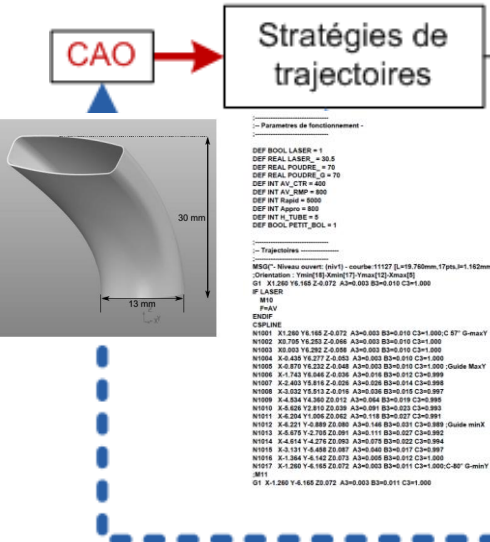
3D pie chart showing the relative impact of Electricity, Powder, and Gas.

Paramètres de fabrication issus du programme à commande numérique

Entrée du module
Sortie du module



Objectif : de la CAO à l'évaluation de la performance environnementale du procédé de mise en forme



Energie électrique **Matière première (poudre métallique)** **Energie hydraulique**

$$Ee_{laser}^{clad}(P_i, t_{fab}^{clad}) = t_{fab}^{clad} * P_{veille\ laser}^{clad} + t_{laser}^{clad} * g(P_i) \quad (kWh)$$

$$Ee_{axes}^{clad}(p_i, S_i, t_{fab}^{clad}) = \sum_{i=1}^5 \int_0^{t_{fab}^{clad}} P_{e_{axes\ i}}(C_m, \Omega_m, \eta) * dt \quad (kWh)$$

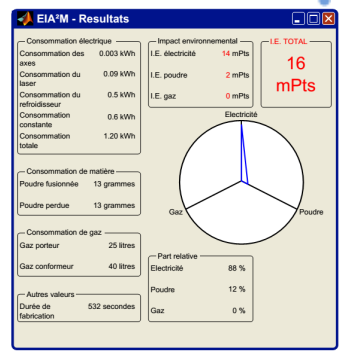
$$E.I.^{clad} = f_{c_{electricite}} * Ee_{electricite}^{clad} + f_{c_{matériau}} * m_{poudre\ proj.}^{clad} + f_{c_{gaz}} * V_{gaz}^{clad} \quad (mPts)$$

$$m_{poudre\ proj.}^{clad} = [r_b(d_m^{clad}, buse) + k * (1 - r_b(d_m^{clad}, buse))] * \frac{d_m^{clad}}{1000} * \frac{t_{fab}^{clad}}{60} \quad (kg)$$

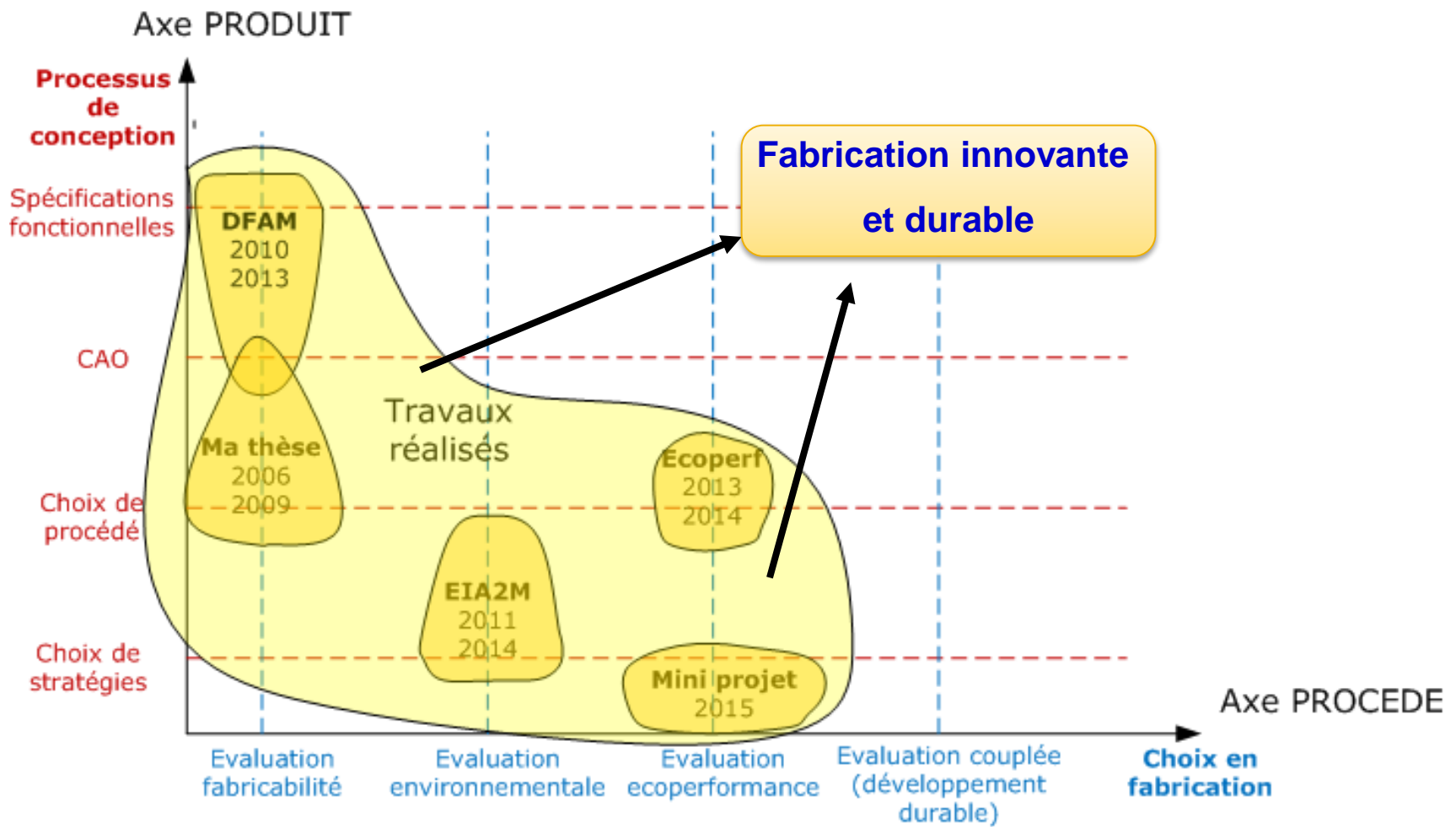
Impacts environnementaux de la fabrication

Optimisation de la fabrication

Optimisation de la conception



4 – Vers une maîtrise...



Travail en collaboration



Pascal, ENS Rennes



Jean-Yves, EC Nantes



Stéphane, EVEA Nantes



Caroline, INRA Grignon



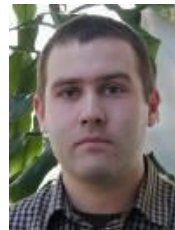
Dominique,
Supméca Toulon



Yann, ENS Rennes



Gilles, ECNantes



Lucas, UTBM Belfort



Nicolas, Arts&Métiers
Bordeaux



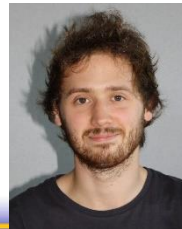
Karel, KU Leuven



Rémi, DFAM,
promo 2006



Florent, EIA2M,
promo 2007



Travail en réseau



18 laboratoires français sur la modélisation du **processus de fabrication**



20 laboratoires, 17 entreprises et 11 institutions sur le développement de **l'écoconception**

Merci pour votre attention

Olivier.Kerbrat@ens-rennes.fr

02.99.05.52.75

Ces travaux de recherche ont été financés par :

