

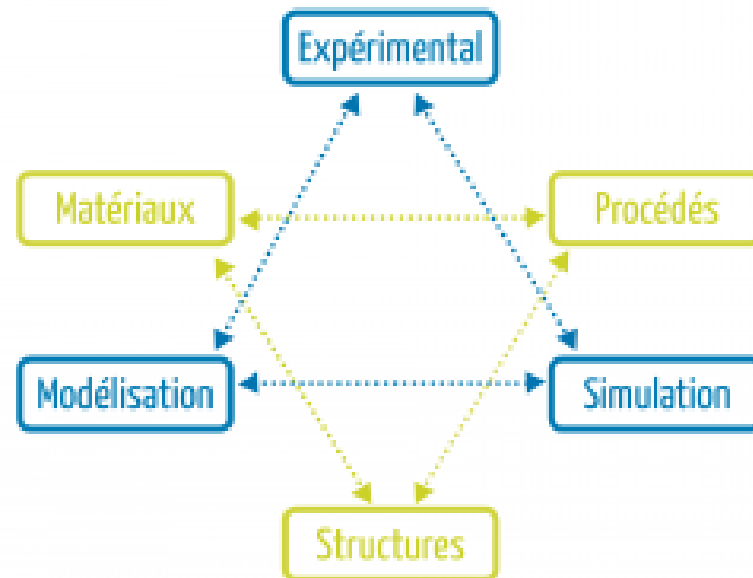
# Inventaire et modélisation des flux d'énergie et de matière d'un procédé de fabrication additive

Mazyar YOSOFI, Olivier KERBRAT, Pascal MOGNOL



# Inventaire et modélisation des flux d'énergie et de matière d'un procédé de fabrication additive

- Créé en 2004, le GeM regroupe aujourd'hui près de 230 personnes sur les sites de Nantes et de Saint Nazaire.
- Rattaché à 3 tutelles (CNRS, École Centrale de Nantes, Université de Nantes), le GeM est structuré en 6 équipes de recherche, autour de 3 thématiques principales :
  - **le Calcul des Structures**
  - **le Génie Civil**
  - **les Matériaux et Procédés**



# Inventaire et modélisation des flux d'énergie et de matière d'un procédé de fabrication additive

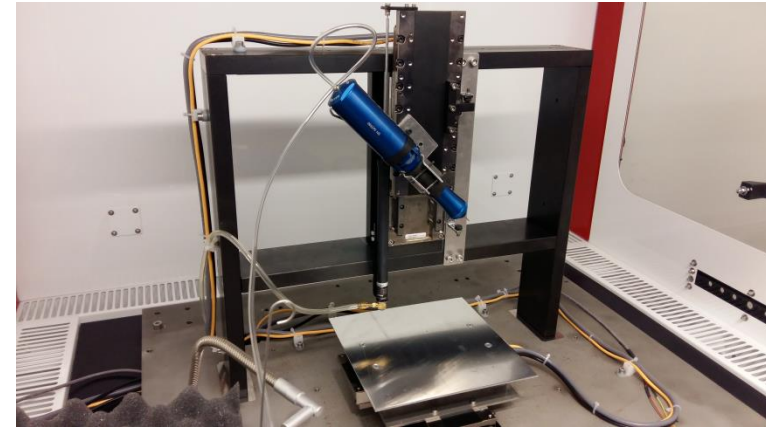
## Equipe P2M (resp. C. Binetruy): Procédés et mécanique des matériaux

- **50 personnes:**
  - 25 permanents (Chercheurs, enseignants-chercheurs, personnels techniques et administratifs)
  - 25 non permanents (doctorants, post-doctorants)
  
- **3 thématiques au sein de l'équipe**
  - Mécanique des élastomères
  - Approche intégrée expérimentale et numérique
  - Procédés de mise en forme:
    - Composites
    - Procédés à hautes puissances pulsées
    - Fabrication additive, procédés innovants

# Inventaire et modélisation des flux d'énergie et de matière d'un procédé de fabrication additive

## Equipe P2M (resp. C. Binetruy): Procédés et mécanique des matériaux

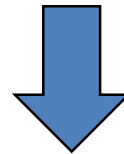
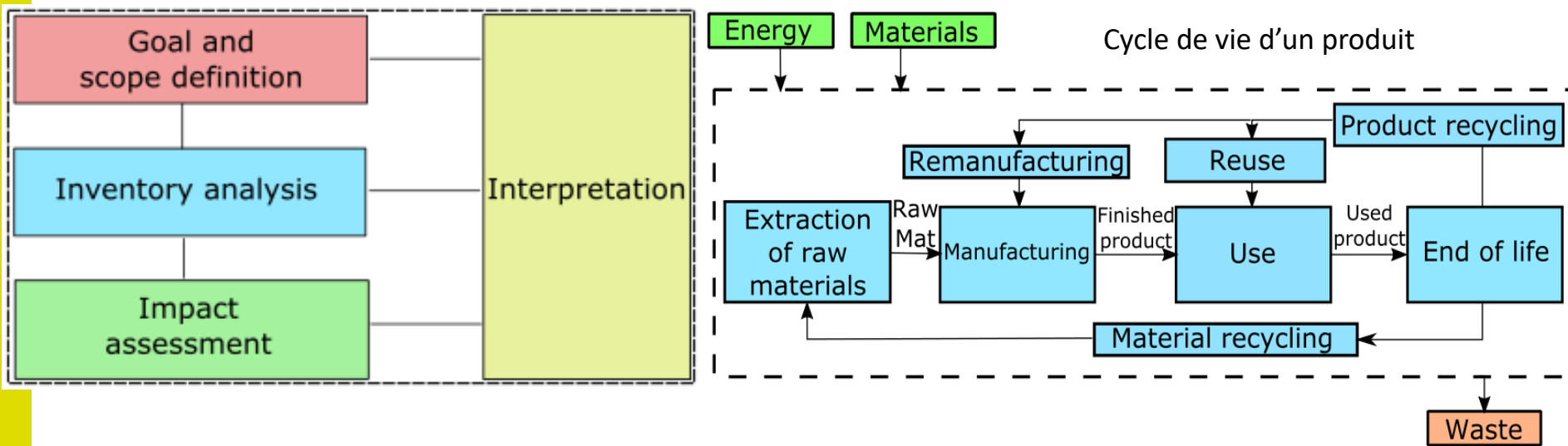
- Hall d'essai procédés composites
- Centre de ressources en essais dynamiques
- Rapid Manufacturing platform



# Introduction

## Analyse de cycle de vie des produits de plus en plus courante...

ISO 14040



**Evaluer avec précision l'impact environnemental des machines de FA pendant l'étape de fabrication d'une pièce**

# Synthèse bibliographique

## Consommation électrique de différentes machines de fabrication additive:

| Process categories         | AM technology     | machine                | material                   | Specific energy consumption (kWh/kg) | Reference              |                    |
|----------------------------|-------------------|------------------------|----------------------------|--------------------------------------|------------------------|--------------------|
| Material extrusion         | FDM               | FDM 1650               | ABS                        | 346                                  | Luo et al.1999         |                    |
|                            |                   | FDM 2000               |                            | 116                                  |                        |                    |
|                            |                   | FDM 8000               |                            | 23                                   |                        |                    |
|                            |                   | FDM Quantum            |                            | 164                                  |                        |                    |
|                            |                   | FDM 3000               |                            | 697                                  | Mognol et al.2006      |                    |
|                            |                   | Dimension SST 1200 es  |                            | 47,6 - 60,8                          | Junk et Côté.2012      |                    |
|                            |                   | FDM 400 mc             | Polycarbonate              | 149                                  | Baumers et al.2010     |                    |
|                            |                   | Dimension SST 768      | ABS P400                   | 191,3                                | Yoon et al.2014        |                    |
| VAT photopolymerization    | SLA               | SLA - 250              | epoxy resin                | 33                                   | Luo et al.1999         |                    |
|                            |                   | SLA - 3000             |                            | 41                                   |                        |                    |
|                            |                   | SLA - 5000             |                            | 21                                   |                        |                    |
| Binder jetting             | Binder jetting    | Z printer              | ABS                        | 14,5 - 17,2                          | Junk et Côté.2012      |                    |
| Powder bed fusion          | DMLS              | EOSINT M270            | Stainless steel            | 114                                  | Baumers et al.2010     |                    |
|                            |                   | EOSINT M250            | metal powder (bronze + Ni) | 710                                  | Mognol et al.2006      |                    |
|                            | SLS               | EOSINT P390            | PA 12                      | 1346                                 | Baumers et al.2010     |                    |
|                            |                   | Vanguard HiQ           |                            | 15                                   | Sreenivasan et al.2009 |                    |
|                            |                   | Sinterstation DTM 2000 |                            | 40                                   | Luo et al.1999         |                    |
|                            |                   | Sinterstation DTM 2500 |                            | 30                                   |                        |                    |
|                            |                   | EOSINT pP760           |                            | PA 2200 (0,12 mm)                    | 39                     | Kellens et al.2010 |
|                            |                   |                        |                            | PA 2200 (0,15 mm)                    | 40                     |                    |
|                            |                   |                        |                            | PA 3200 GF (0,15mm)                  | 36                     |                    |
|                            | Sibterstation HiQ | PA                     | 68                         | Telenko et al.2012                   |                        |                    |
|                            | SLM               | MTT, SLM 250           | Stainless steel 316L       | 31                                   | Baumers et al.2010     |                    |
| M3 linear                  |                   | 164                    |                            |                                      |                        |                    |
| EBM                        | Arcam A1          | T1 -6Al -4V            | 50                         |                                      |                        |                    |
| Directed energy deposition | CLAD              | Huron kX8              | metal powder               | 24,2                                 | le Bourhis et al.2014  |                    |
|                            | LENS              | Optomec lens 750       | Stainless steel 316L       | 385                                  | Wilson et al.2014      |                    |

# Synthèse bibliographique

## Consommation électrique de différentes machines de fabrication additive:

| Process categories   | AM technology  | machine           | material                   | Specific energy consumption (kWh/kg) | Reference             |
|--|----------------|-------------------|----------------------------|--------------------------------------|-----------------------|
| Material extrusion   | FDM            | FDM 1650          | ABS                        | 346                                  | Luo et al.1999        |
|  |                | FDM 2000          |                            | 116                                  |                       |
|  |                | FDM 8000          |                            | 23                                   |                       |
|  |                | FDM Quantum       |                            | 164                                  |                       |
| <div style="border: 1px solid black; border-radius: 15px; padding: 10px; background-color: #e6f2ff; display: inline-block;"> <b>Des disparités dans la consommation électrique des machines</b> </div> |                |                   |                            |                                      |                       |
| VAT photopolymerization  | SLA            | SLA - 250         | epoxy resin                | 33                                   | Luo et al.1999        |
|  |                | SLA - 3000        |                            | 41                                   |                       |
|  |                | SLA - 5000        |                            | 21                                   |                       |
| Binder jetting   | Binder jetting | Z printer         | ABS                        | 14,5 - 17,2                          | Junk et Côté.2012     |
|  | DMLS           | EOSINT M270       | Stainless steel            | 114                                  | Baumers et al.2010    |
|  |                | EOSINT M250       | metal powder (bronze + Ni) | 710                                  | Mognol et al.2006     |
|  |                |                   |                            | 12                                   | Baumers et al.2010    |
|  |                |                   |                            | 12                                   | et al.2009            |
|  |                |                   | PA                         |                                      | 2010                  |
|  |                | Sibterstation HiQ | PA                         | 68                                   | Telenko et al.2012    |
|  | SLM            | MTT, SLM 250      | Stainless steel 316L       | 31                                   | Baumers et al.2010    |
|  |                | M3 linear         |                            | 164                                  |                       |
|  | EBM            | Arcam A1          | T1 -6Al -4V                | 50                                   |                       |
| Directed energy deposition   | CLAD           | Huron kX8         | metal powder               | 24,2                                 | le Bourhis et al.2014 |
|  | LENS           | Optomec lens 750  | Stainless steel 316L       | 385                                  | Wilson et al.2014     |

**Machines**  
≠

**Paramètres de fabrication**  
≠

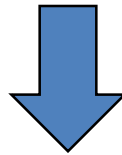
**Pièces**  
≠

**démarches de mesures**  
≠

# Synthèse bibliographique

## Verrous scientifiques :

- Données d'inventaires incomplètes
- Pas assez de démarche pour évaluer les performances environnementales des procédés de fabrication additive
- Hétérogénéité des démarches permettant l'acquisition des données d'inventaire
- Des procédés moins renseignés que d'autres...
  - Extrusion de matière
  - Jet de matériau

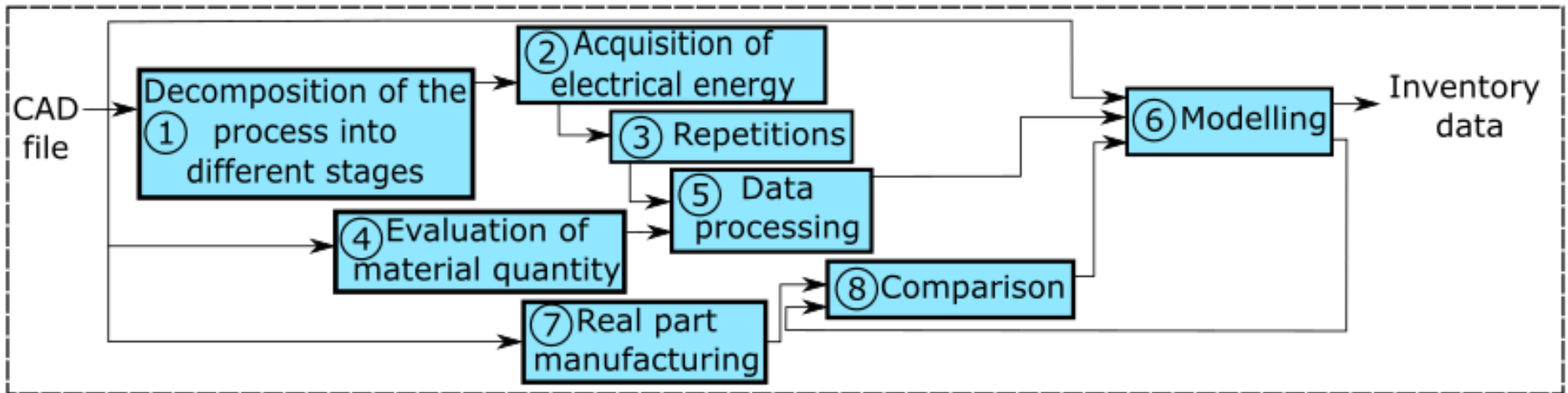
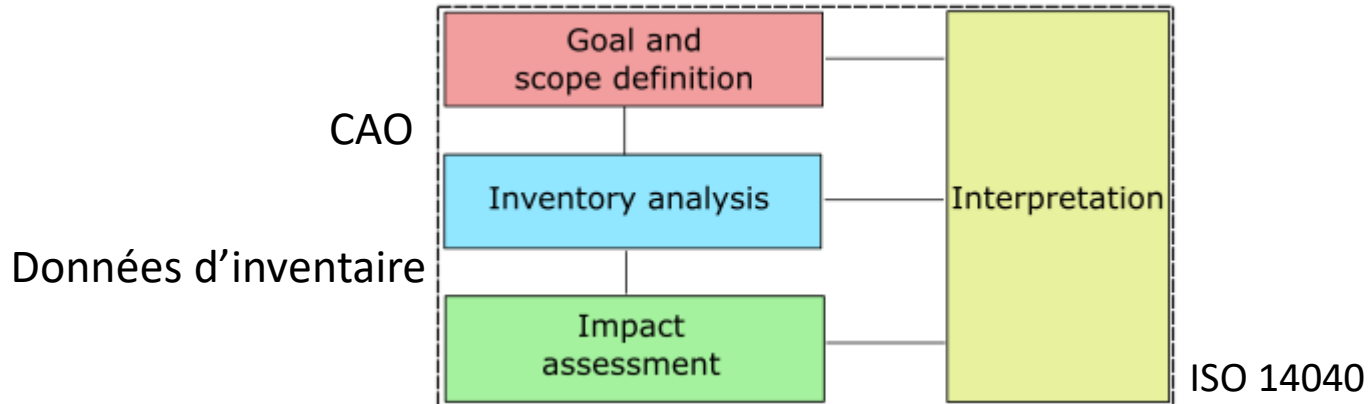


**Méthode générique d'acquisition de données d'inventaire pour les procédés de FA en phase de fabrication**

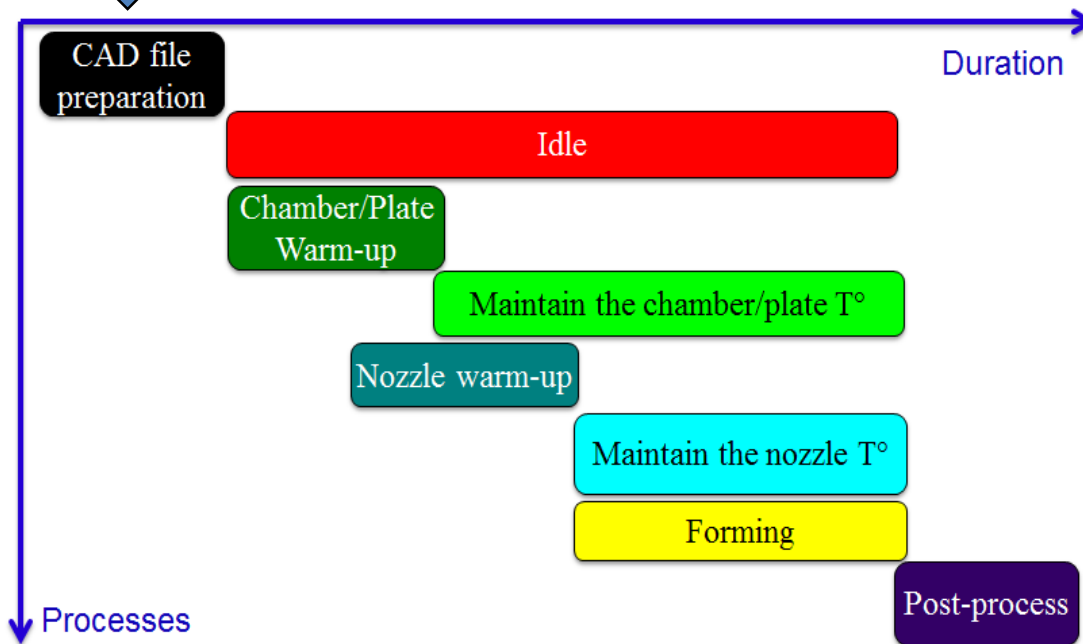
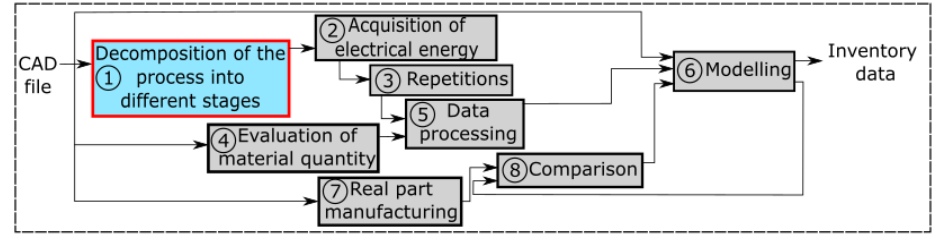
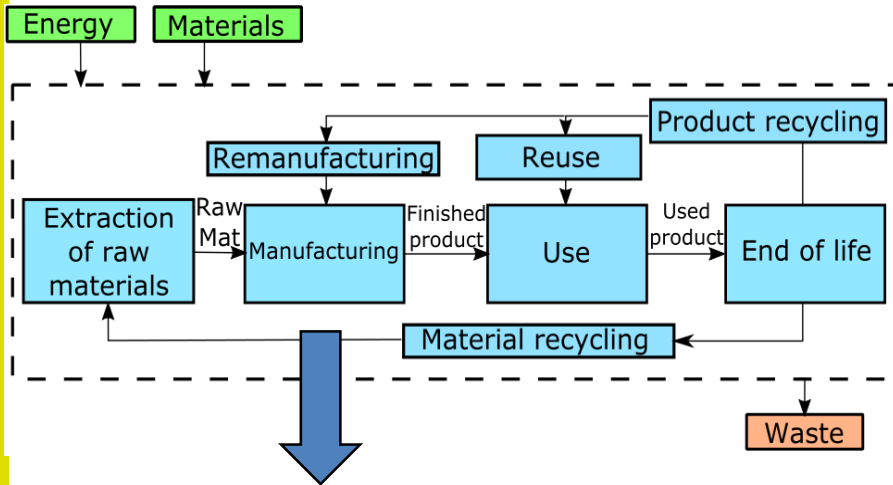


# Méthodologie

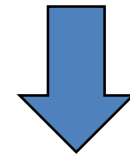
Définition d'une méthode pour prédire les données d'inventaire:



# Méthodologie – Décomposition du process

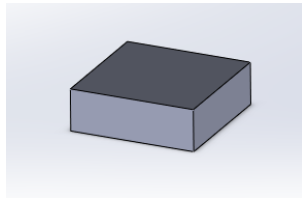
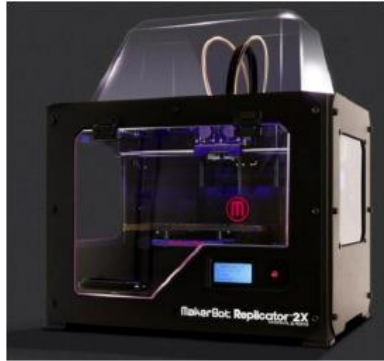


Vision globale

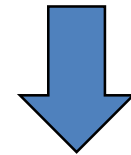
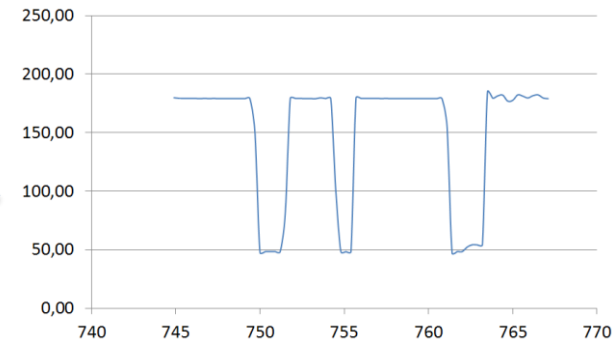
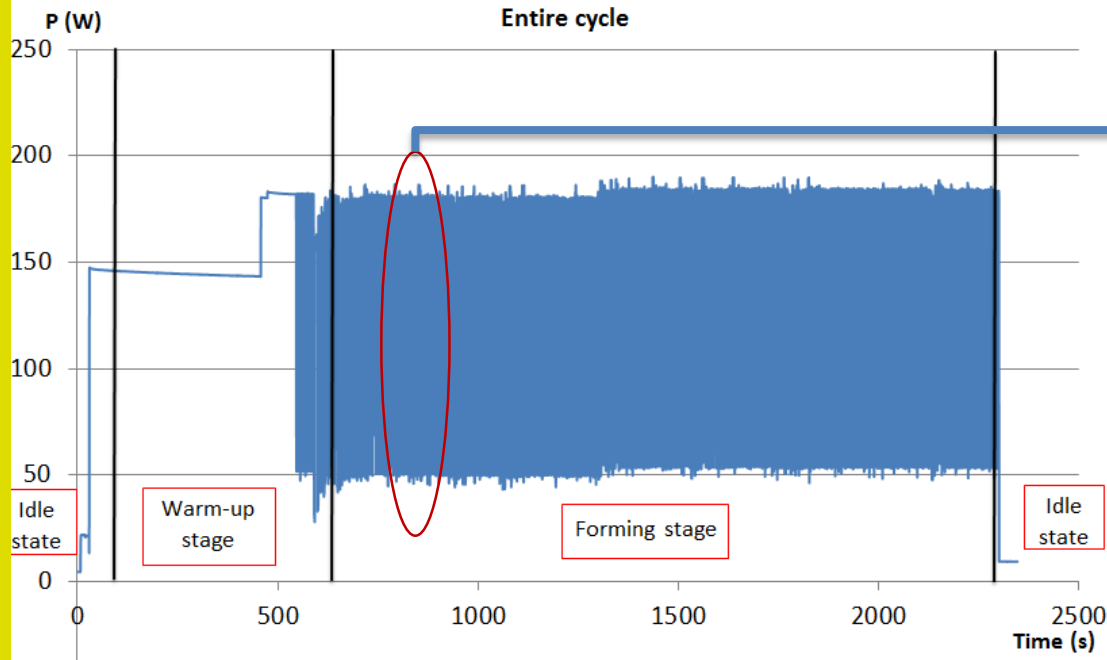
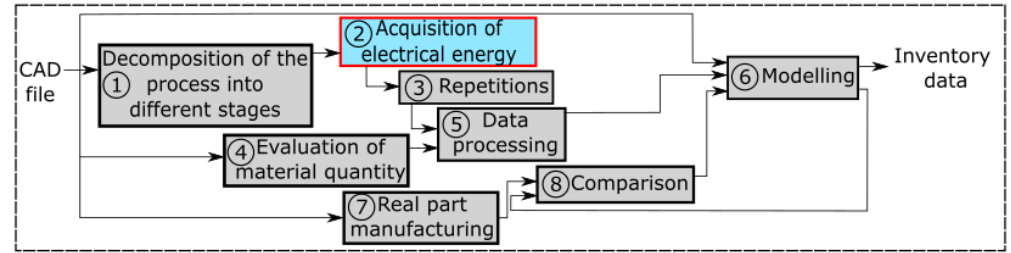


Vision locale

# Méthodologie – Acquisition de l'énergie électrique

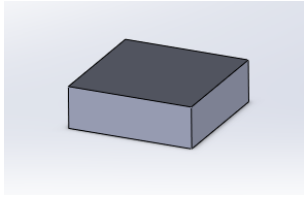


30 x 30 x 10 mm

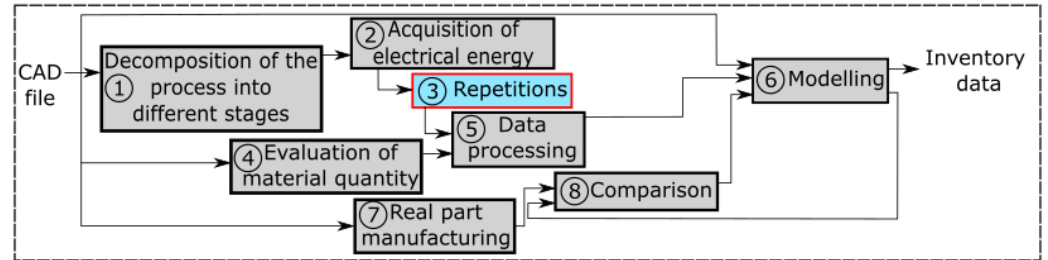


Puissance moyenne

# Méthodologie – Répétitions



30 x 30 x 10 mm

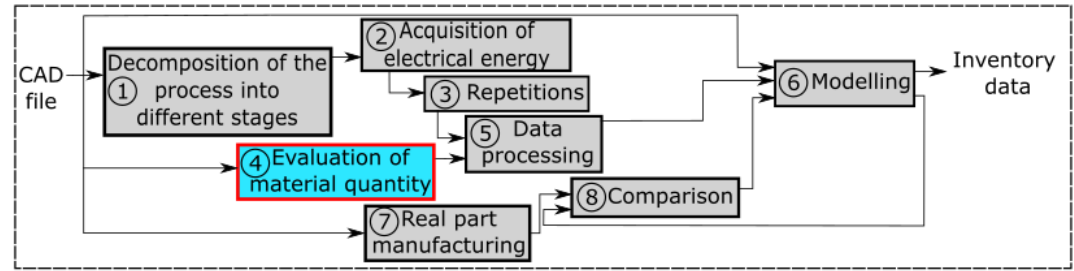
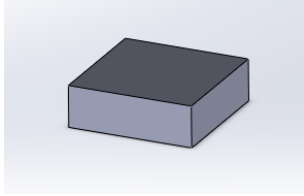


Préparation

| Stage                           | Average power (W) | Standard deviation (W) |
|---------------------------------|-------------------|------------------------|
| CAD file preparation            | 31.6              | 0.34                   |
| Idle state                      | 4.40              | 0.28                   |
| Plate warm-up                   | 137.39            | 1.19                   |
| Maintain the plate temperature  | 74.15             | 0.81                   |
| Nozzle warm up                  | 39.57             | 1.06                   |
| Maintain the nozzle temperature | 25.14             | 0.72                   |
| Forming stage                   | 21.28             | 0.59                   |

- Mesure de la puissance moyenne Phase/phase
- Mesures dans les mêmes conditions initiales
- 5 mesures réalisées par phase.

# Méthodologie – Evaluation de la quantité de matière



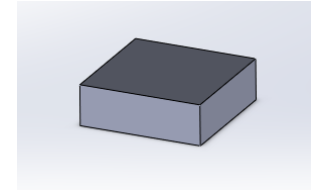
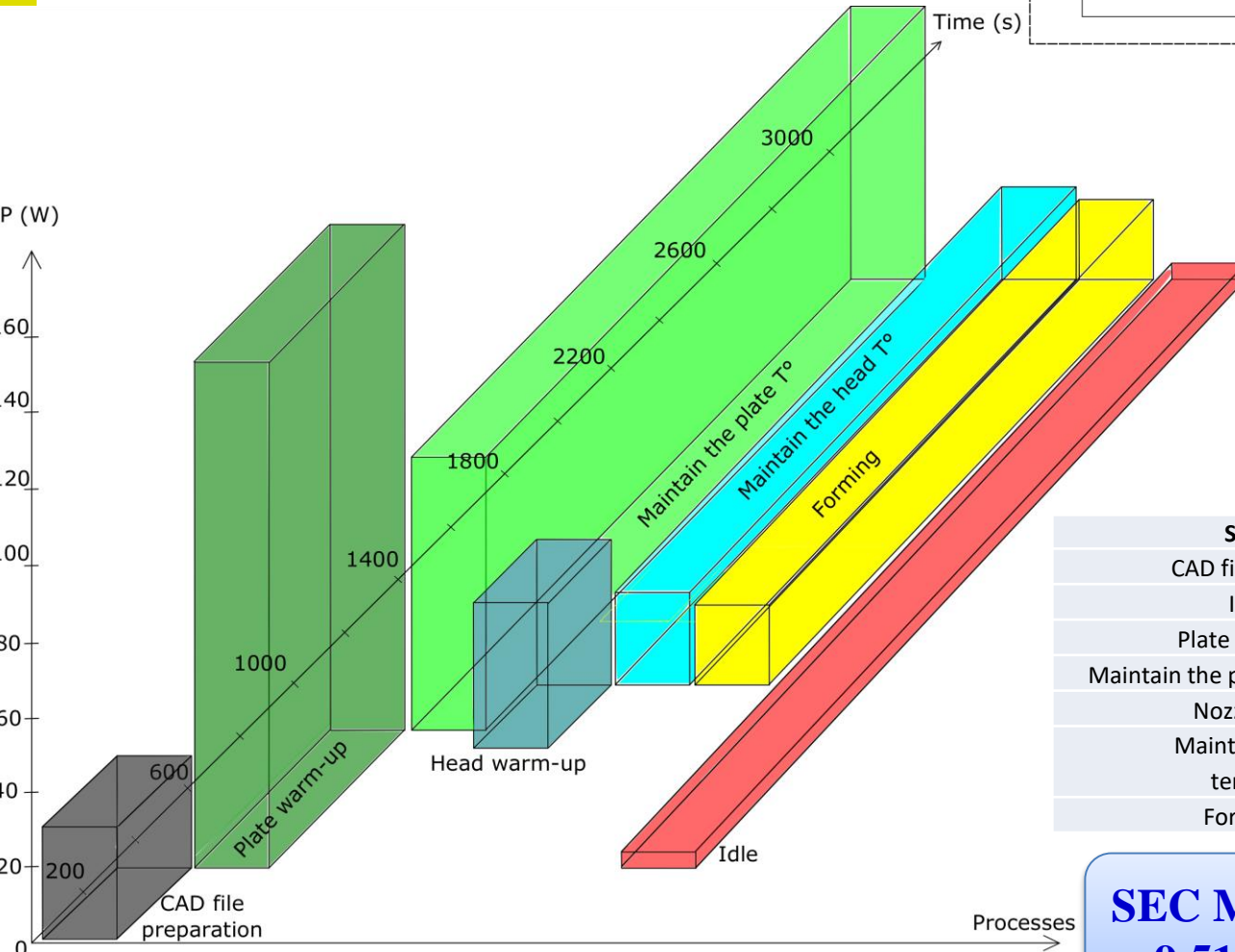
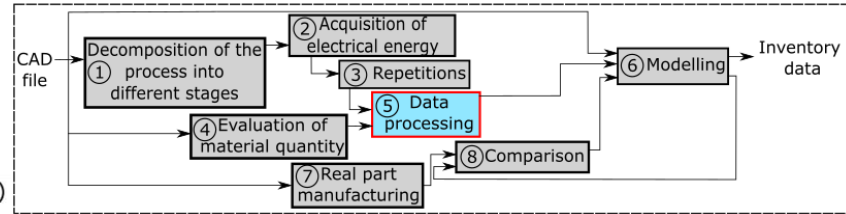
$$M_{part} = \frac{\rho_{part} \cdot V_{layer} \cdot H_{part}}{H_{layer}}$$

$$M_{support} = \frac{\rho_{support} \cdot V_{layer} \cdot H_{part}}{H_{layer}}$$

- Mesures réalisées pour 5 pièces identiques
- Moyen de mesure précis à 0,1 g
- De 40 % à 1,1 % d'erreur

| Material              | $\rho_{ABS}$<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | $V_{layer}$<br>(mm <sup>3</sup> ) | $H_{part}$<br>(mm) | $H_{layer}$<br>(mm) | Calculated<br>mass (g) | Real<br>mass<br>(g) | software<br>(g) |
|-----------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|--------------------|---------------------|------------------------|---------------------|-----------------|
| 30 x 30 x<br>10 parts | 1080                                 | 163,6                             | 10                 | 0,2                 | 8.6                    | 8.7                 | 12.2            |

# Méthodologie – Traitement des données



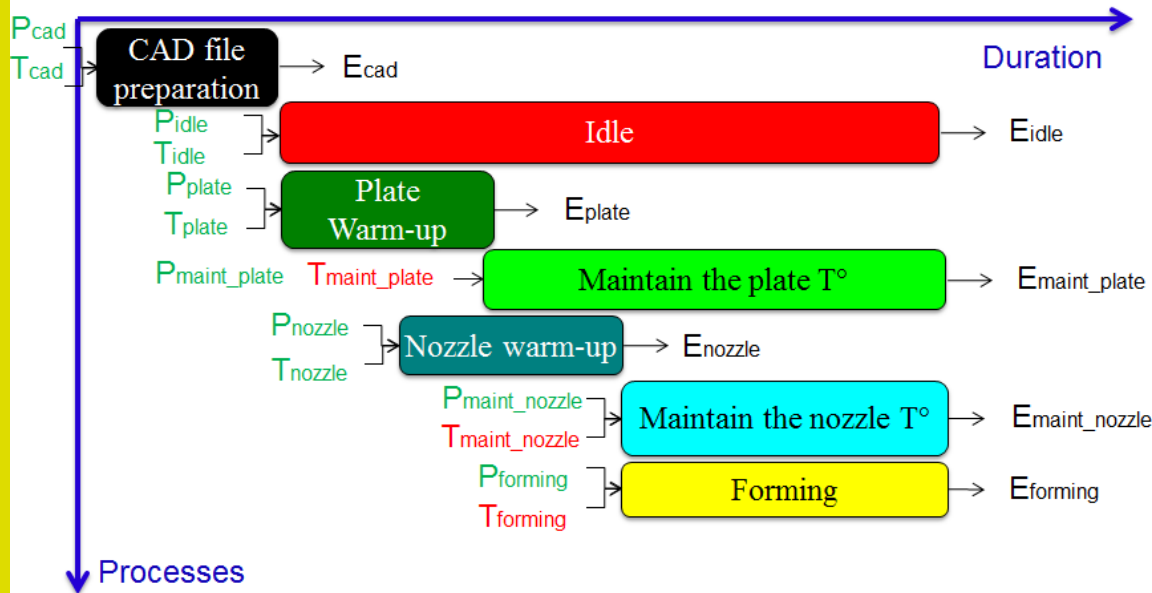
Masse: 8,7 g

| Stage                           | Power (W) | Duration(s) |
|---------------------------------|-----------|-------------|
| CAD file preparation            | 31,6      | 300         |
| Idle state                      | 4,40      | 2280,00     |
| Plate warm-up                   | 137,39    | 525,00      |
| Maintain the plate temperature  | 74,15     | 1755,00     |
| Nozzle warm up                  | 39,57     | 170,00      |
| Maintain the nozzle temperature | 25,14     | 1735,00     |
| Forming stage                   | 21,28     | 1735,00     |

**SEC Makerbot :  
9,51 kWh/kg**


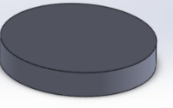




# Méthodologie – Modélisation et comparaison



|                                      |                  |        |
|--------------------------------------|------------------|--------|
| Date                                 | 01/03/2016       |        |
| Name of part                         | cylindrical part |        |
| Machine                              | TIC              |        |
| Material                             | ABS              |        |
| Mass of the part (g)                 | 4                |        |
| Mass support/raft (g)                | 0                |        |
| Estimated time                       | hour             | minute |
|                                      | 0                | 13     |
|                                      | 13               |        |
| Real time                            | hour             | minute |
|                                      | 0                | 14,11  |
|                                      | 14,11            |        |
| Energy (Wh)                          | 30,60            |        |
| Cost(euros)                          | 2,29             |        |
| Specific energy consumption (kWh/kg) | 7,6495625        |        |

# Méthodologie – Modélisation et comparaison

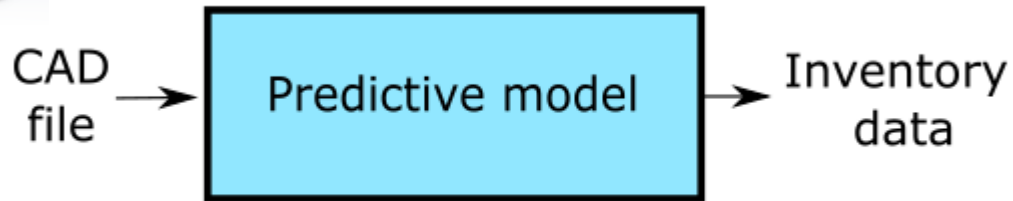
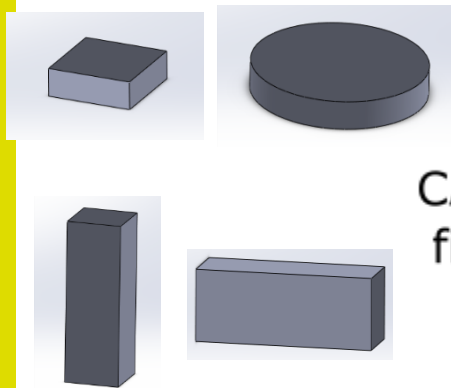
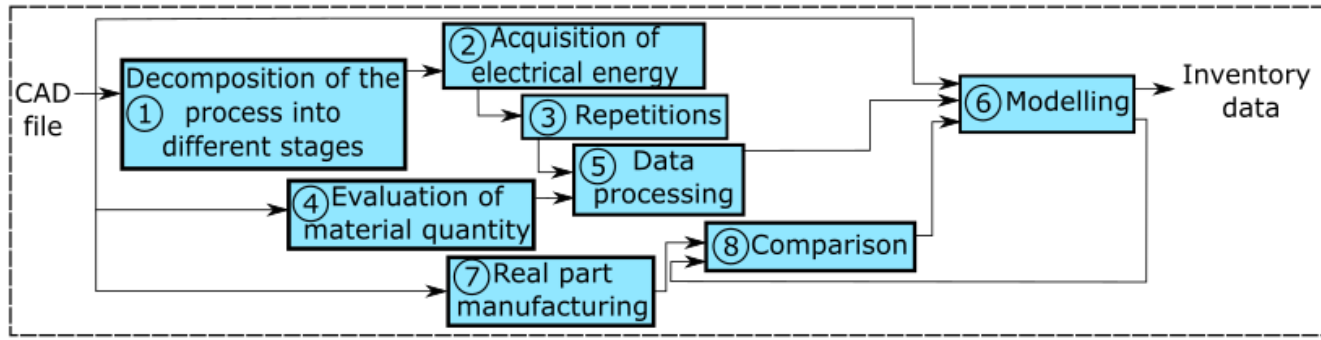
| Pièce   | Dimensions       | Durée estimée (min) | Durée réelle (min) | Erreur temps (%) | SEC (kWh/kg) | Erreur énergie (%) |
|---|------------------|---------------------|--------------------|------------------|--------------|--------------------|
|    | 30*30*10         | 40                  | 42                 | 4,76             | 9,15         | 1,9                |
|    | R=15 ;<br>h=4,25 | 13                  | 14,11              | 13,31            | 7,54         | 7,01               |
|    | 10*10*30         | 23,5                | 24,73              | 4,97             | 13,01        | 4,88               |
|  | 10*10*30         | 17                  | 17,78              | 4,39             | 9,38         | 4,16               |

|                                      |                  |           |
|--------------------------------------|------------------|-----------|
| Date                                 | 01/03/2016       |           |
| Name of part                         | cylindrical part |           |
| Machine                              | TIC              |           |
| Material                             | ABS              |           |
| Mass of the part (g)                 | 4                |           |
| Mass support/raft (g)                | 0                |           |
| Estimated time                       | hour             | minute    |
|                                      | 0                | 13        |
|                                      | 13               |           |
| Real time                            | hour             | minute    |
|                                      | 0                | 14,11     |
|                                      | 14,11            |           |
| Energy (Wh)                          |                  | 30,60     |
| Cost(euros)                          |                  | 2,29      |
| Specific energy consumption (kWh/kg) |                  | 7,6495625 |



# Synthèse

## Méthodologie -> données d'inventaire



kWh

kg

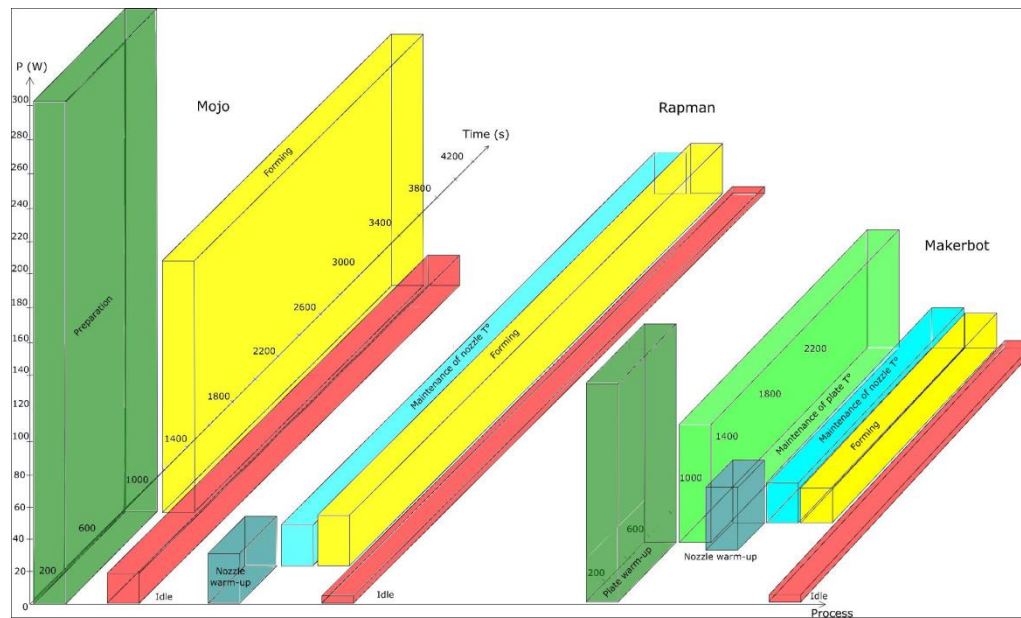
+

Coût

Qualité

## BILAN DES APPORTS:

- Méthodologie d'évaluation environnementale d'un procédé de FA en phase de fabrication
- Modèle de prédiction des données d'inventaire pour toute géométrie de pièce
- Méthodologie appliqué à d'autres machines





## Projet pour l'année 2017:

- Consolidation de la méthodologie sur d'autres machines de FA (fusion sur lit de poudre, stéréolithographie...) à travers un cas d'étude



- Optimisation d'un procédé de FA d'un point de vue environnemental sans dégrader la qualité d'une pièce...

# Merci pour votre attention

mazyar.yosofi@ens-rennes.fr

Ce travail est réalisé avec le soutien financier de la région Bretagne

