

PRCI EcoDFAM 2022-2025

Outil d'aide à la décision pour l'écoconception de pièces obtenues par fabrication additive

Porteur universitaire :

Olivier KERBRAT

Porteur industriel :

Jérôme RIBEYRON

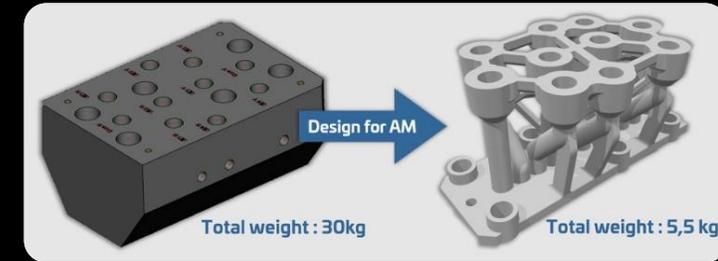


Partenaires :



➤ **En quoi la fabrication additive peut nous amener à réduire notre impact environnemental ?**

1. Quels sont les usages actuels de la FA qui présentent un potentiel de réduction d'impact environnemental véritable ?
2. Comment devons-nous concevoir les produits et systèmes pour qu'ils soient « écofabriquables » (moins coût, moins énergie, moins de déchets, moins de rejets...) sur les machines de FA ?
3. Quel outil d'aide à la décision faut-il mettre à disposition des concepteurs pour les assister dans l'utilisation optimale des technologies de FA ?



Sommaire

- 1) Rappel sur les résultats de la 1^{ère} année
- 2) Déroulement de la 2^{ème} année
- 3) Perspectives pour la 3^{ème} année

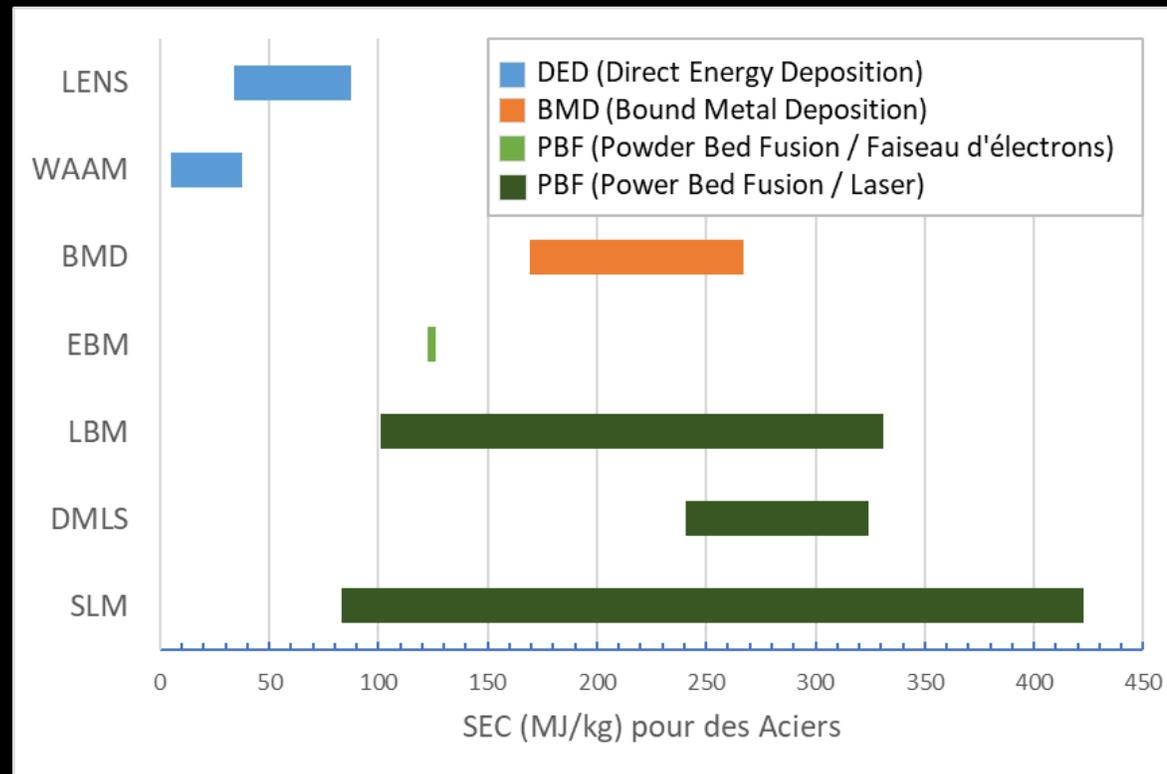
Sommaire

- 1) Rappel sur les résultats de la 1^{ère} année**
- 2) Déroulement de la 2^{ème} année
- 3) Perspectives pour la 3^{ème} année

• Etat de l'art sur les usages et techno de FA

- Analyse des études de cas de l'état de l'art (78 études)
- Grille d'analyse de la littérature
- Valeurs de SEC (Specific Energy Consumption) :

énergie nécessaire
pour mettre en forme
1 kg de matière





• ACV du WAAM

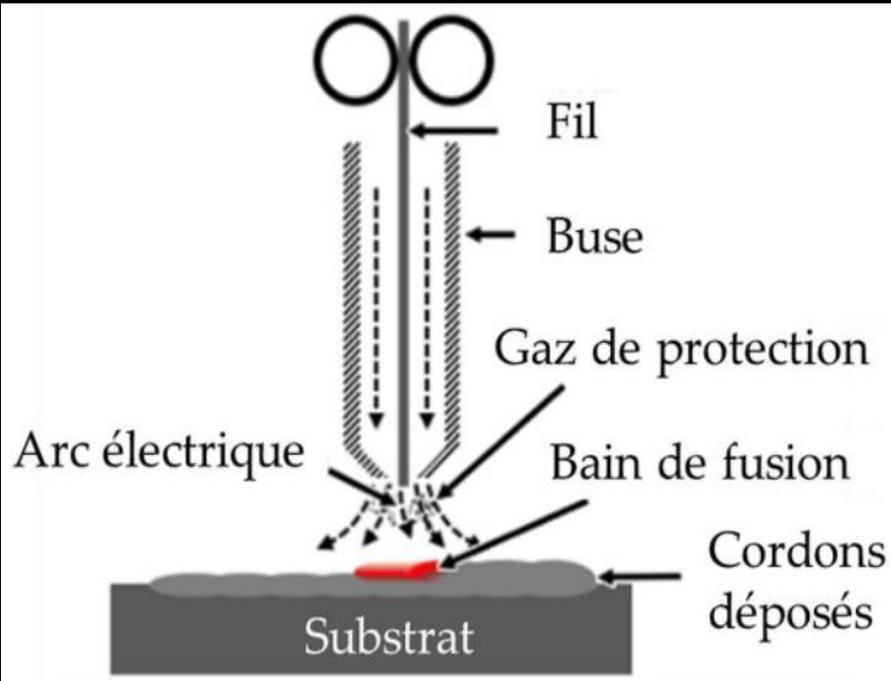


Schéma du principe de fonctionnement Wire Arc Additive Manufacturing



Exemple de pièce réalisée en WAAM



Référence	Matériau	SEC WAAM (MJ/kg)	Emissions associées (gCO ₂ eq/kg)
Jackson 2016	Acier ER70S-6	32,3	269
Jackson 2018	Acier ER70S-6	37,5	313
Priarone 2019	Acier ER70S-6	4,54	38
Campatelli 2020	Acier EN S235JR	19,76	165
Priarone 2020	Acier ER70S-6	23,7	198
Priarone 2021	Acier AISI H13	6,7	59
Kokare 2023	Acier ER70 HSLA	4,22	35
Reis 2023	Acier ER90	4,98	42
Reis 2023	Acier ER90	7,2	60
Reis 2023	Acier ER90	8,1	68
Shah 2023	Acier S355 / Inox 304	8,85	74
Bekker 2018	Inox 308L	9,79	82
Dias 2022	Inox AISI 316L	9,77	81
Priarone 2020	Alu AA2319	6,3	53
Priarone 2020	Titane Ti-6Al-4V	33,4	278
Sword 2023	Titane Ti-6Al-4V	14,9	124

Acier :
35 – 313
gCO₂eq/kg

Inox :
74 – 82
gCO₂eq/kg

Alu :
53
gCO₂eq/kg

Titane :
124 – 278
gCO₂eq/kg



• Comparaison avec des procédés conventionnels

Périmètre considéré : préparation des matières premières, fabrication et post-traitements

WAAM / Usinage
(même état de surface)

- Matière : **réduction** de **65%** de l'utilisation de matières premières
- Energie : **réduction** de **28%** de la consommation

WAAM / Fonderie
(moulage au sable)

- Matière : **réduction** de **25%** de l'utilisation de matières premières
- Energie : consommation **équivalente**

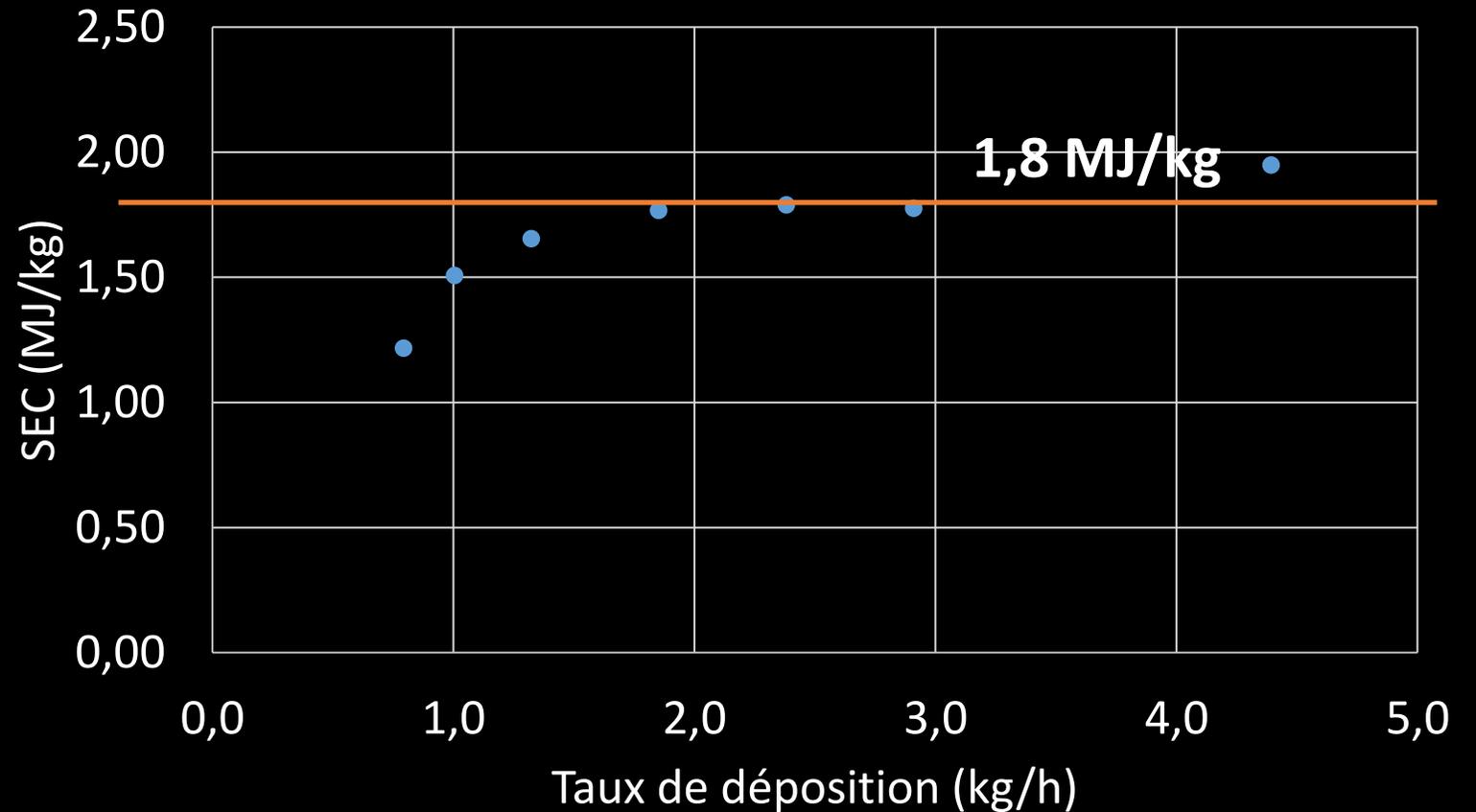
➤ Comparaisons pour une **même pièce**

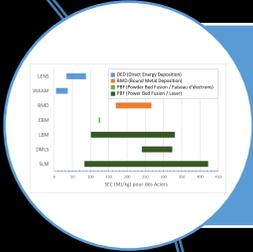


- **Expérimentation du couplage haute productivité / maîtrise de la consommation**



Equipements utilisés : Cellule robotisée Yaskawa et générateur type CMT





Consommation énergétique de la FA métallique

- Résultats de SEC pour les technologies de FA métallique
- Focus sur le WAAM pour son efficacité énergétique



Analyse environnementale du WAAM

- Identification des étapes du cycle de vie les plus impactantes sur la consommation d'énergie
- Conversion de la consommation d'énergie en impact environnemental
- Avantages du WAAM par rapport à l'usinage et à la fonderie concernant l'utilisation de matières premières et la consommation d'énergie

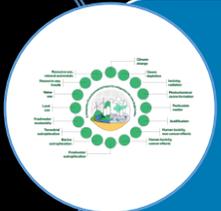


Etude expérimentale de l'impact du taux de déposition sur la consommation énergétique

- Augmentation du SEC avec celle du taux de déposition mais plafonnement vers 1,8 MJ/kg
- Obtention de SEC faibles en comparaison avec les technologies de FA métallique et les procédés traditionnels

Perspectives

- Approfondir l'analyse de cycle de vie sur la comparaison WAAM / procédés traditionnels en élargissant le périmètre d'étude et en prenant en compte plus de catégories d'impacts



Conférence nationale



Conférence internationale

XXXV CIRP Sponsored Conference on Supervising and Diagnostics of Machining Systems

MANUFACTURING AUTONOMY ROBUST FUNCTIONS

The Organizing Committee cordially invites you to participate at the XXXV CIRP Sponsored Conference on Supervising and Diagnostics of Machining Systems, which will be held from the **23rd to 27th June 2024** in Karpacz, Poland. We are convinced that your or your co-workers' contribution to the Conference will be of great interest and we believe it will be of considerable value to you.



Article

The Potential of Additive Manufacturing of Metal Components to Reduce Environmental Impacts

Antoine Balidas ¹ ✉, Olivier Kerbrat ¹, Jean-Yves Hascoet ²

[More details](#)

Journal of Machine Engineering 2024;24(2):94-104

> DOI: <https://doi.org/10.36897/jme/186988>

[Article \(PDF\)](#)

[References \(17\)](#)

Programme ANR PRC



Sommaire

1) Rappel sur les résultats de la 1^{ère} année

2) Déroulement de la 2^{ème} année

- Prolongation de l'étude du SEC et applications à d'autres procédés FA
- Proposition d'un formalisme pour l'outil d'aide à la décision EcoDFAM

3) Perspectives pour la 3^{ème} année

Quantification de la consommation énergétique du moyen de production additif EBM (Electron Beam Melting)

Stage de M2 : de Sarah Benshir

Encadrement : Pierre-thomas Doutré
Matthieu Museau
Olivier Kerbrat

UMR 5272



01

Recherche bibliographique

02

Constitution de la problématique et objectifs de l'étude

03

Proposition de limites pour le calcul du SEC

04

Protocole

05

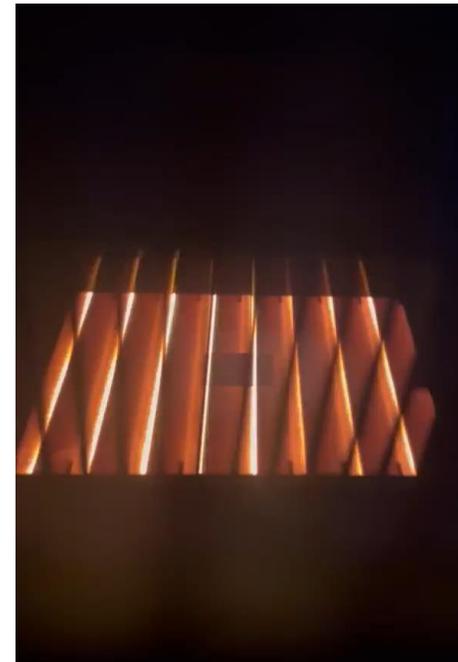
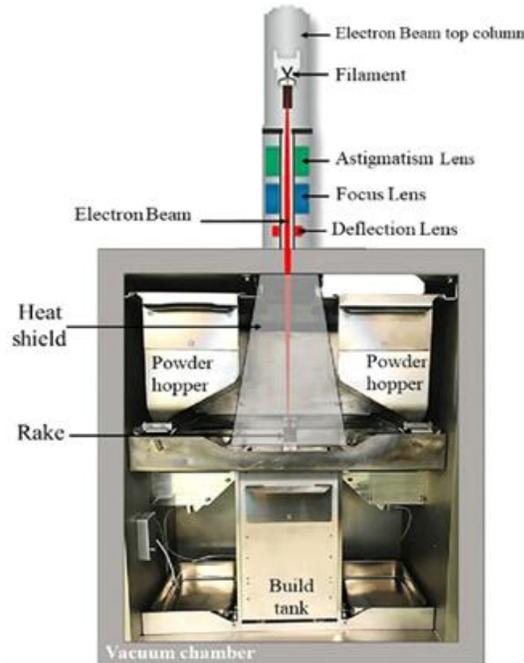
Résultats et analyse

06

Perspectives et conclusion

Technologie fusion sur lit de poudre

Source énergie : Faisceau d'électron



Matériaux :
 Poudre de Titane Ti6Al4V
 Inconel

Machine EBM Arcam A1

Processus d'impression par EBM

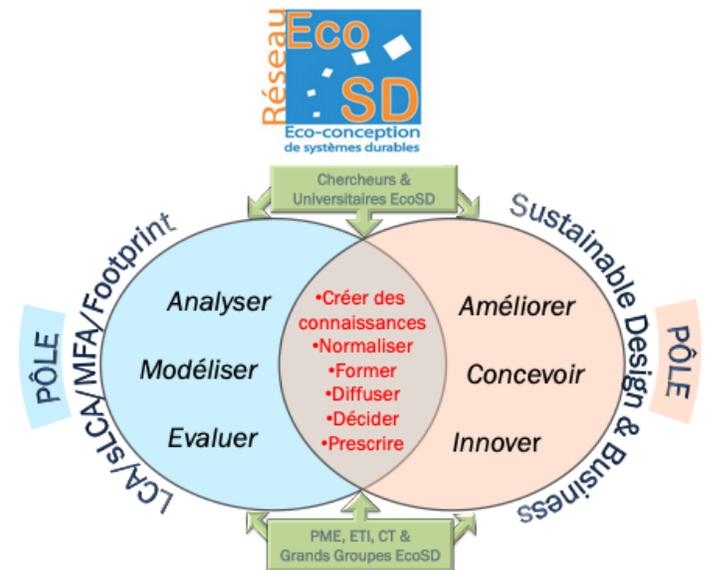
1.

Recherche bibliographique

- Quantification de la **consommation énergétique** du moyen de **production additif EBM** (Electron Beam Melting)

– Mot clé :

- Energy consumption
- Additive manufacturing
- EBM
- Energy density
- Eco efficiency



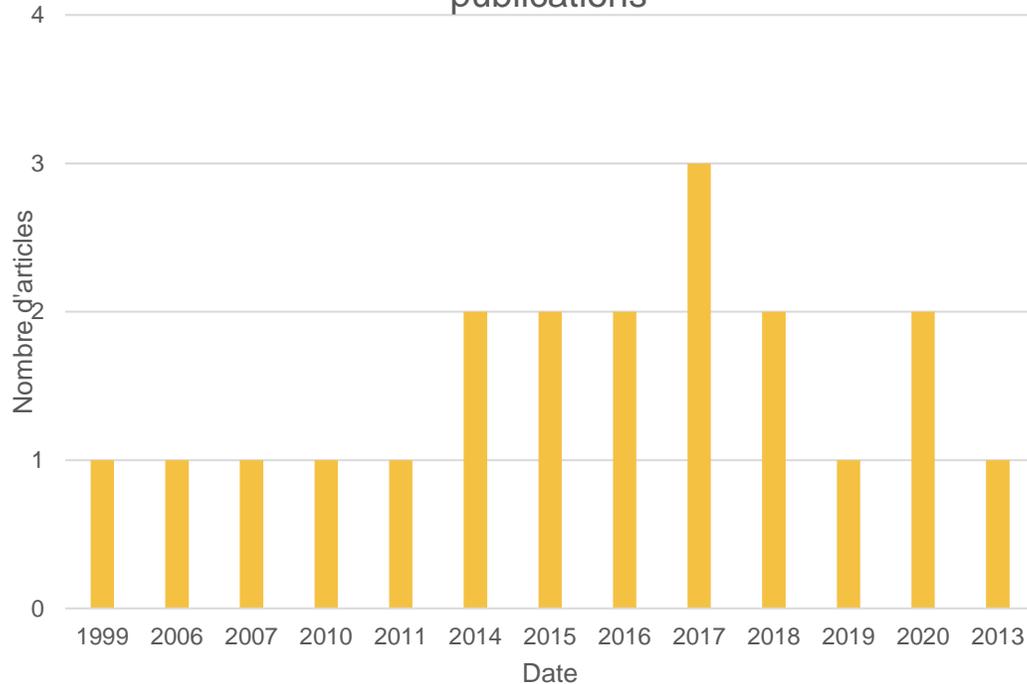
Organisation
EcoSD

Etat de l'art : Position du sujet dans la littérature



Comment se positionne le sujet de la consommation énergétique de l'EBM dans la littérature

Répartitions des articles selon la date de publications



Répartition des articles traitant de la consommation énergétique de l'EBM selon leur date de publication

- 7 articles de comparaison FA VS Usinage
- 3 Articles ACV
- 7 articles comparaison procédé de FA entre eux
 - 2 comparaisons propriété Meca VS consommation énergétique
- 3 articles qui traitent de la pertinence de la FA aux vues des enjeux sociétaux-économique

Pas d'étude de la consommation énergétique spécifique à l'EBM

Concernant l'ACV

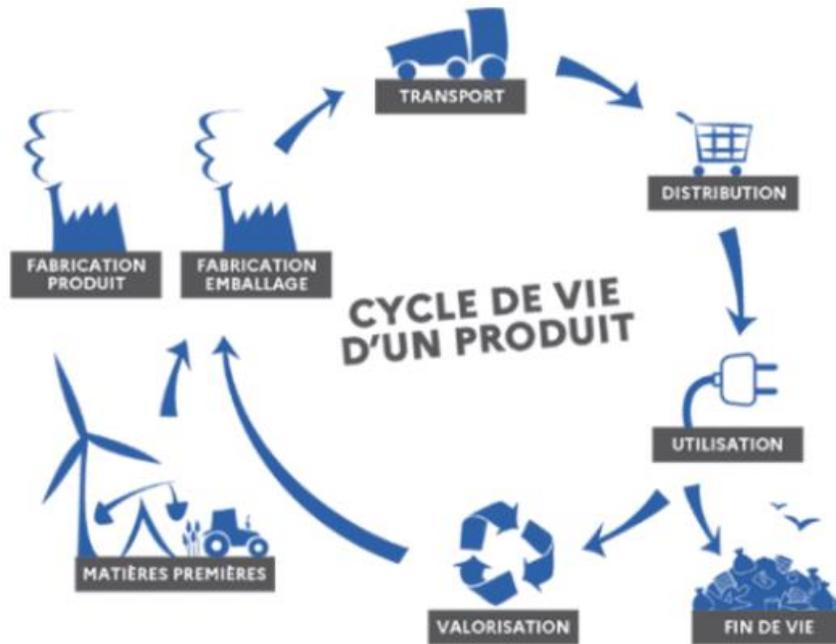


Manque de données

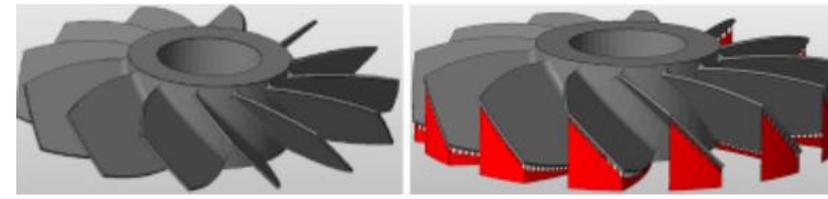
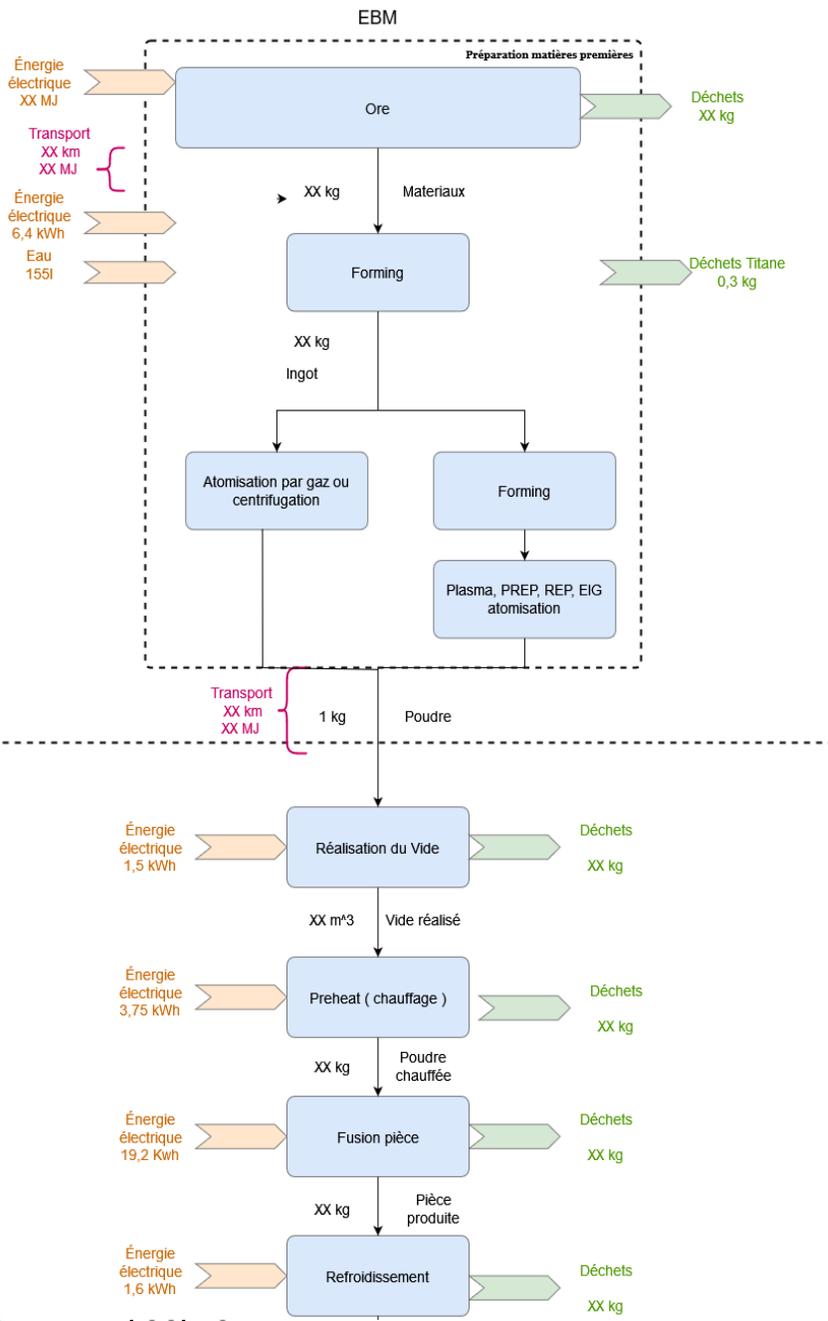
Récoltes des données compliquées

Contextualisation de l'étude

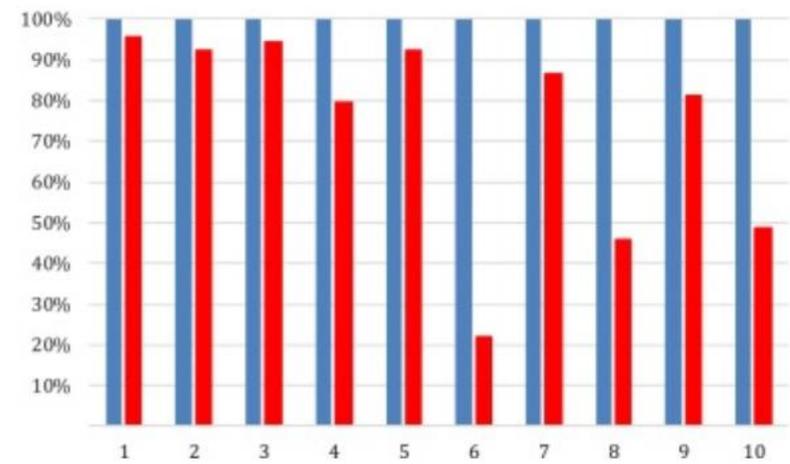
Conformité / Origine des données



Etat de l'art : article Paris & Museau



Turbine imprimée



■ EBM ■ Usinage

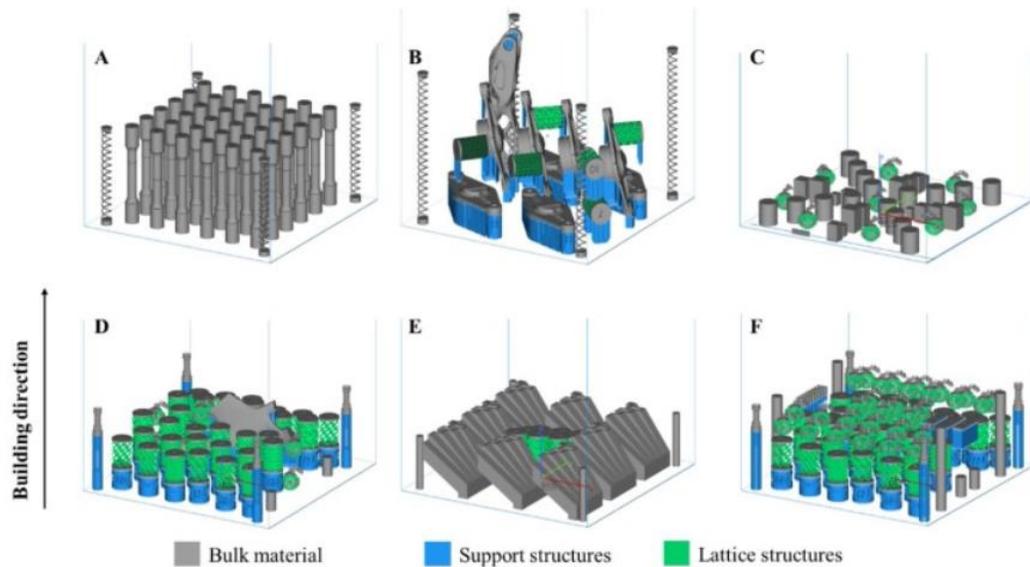
Résultats de l'ACV EBM VS usinage

1. déplétion abiotique,
2. acidification,
3. échauffement de la planète,
4. écotox aquatique d'eau douce
5. écotoxicité marine aquatique
6. écotoxicité terrestre
7. fossile non renouvelable,
8. nucléaire non renouvelable
9. potentiel renouvelable
10. eau renouvelable

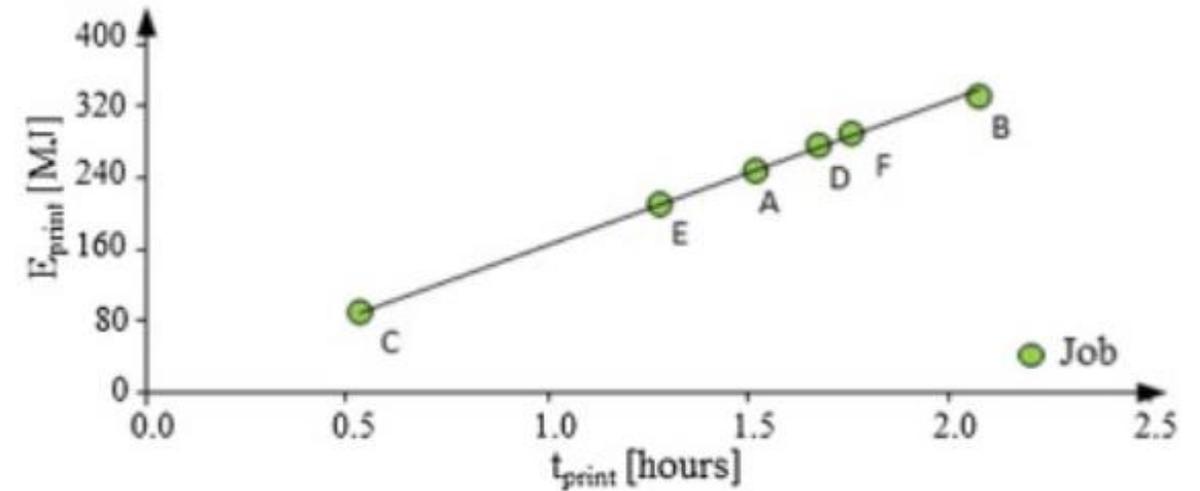
Etat de l'art : Article de Cozzolino

- Impression de différent jeu de pièces

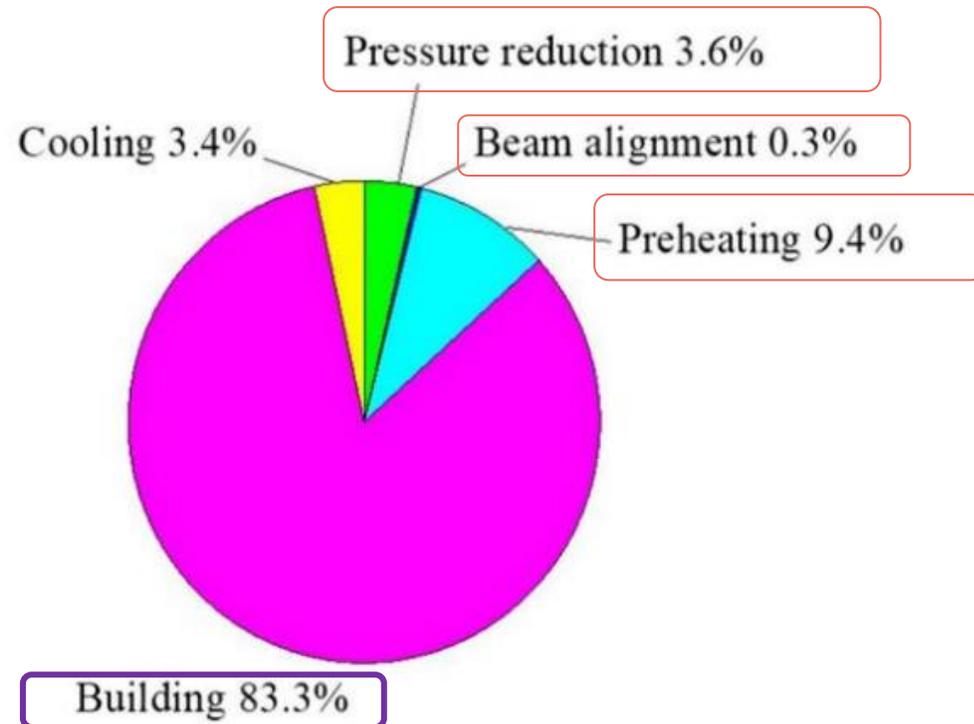
- Loi linéaire en fonction du temps



Jeu de pièces étudié dans l'article de Cozzolino



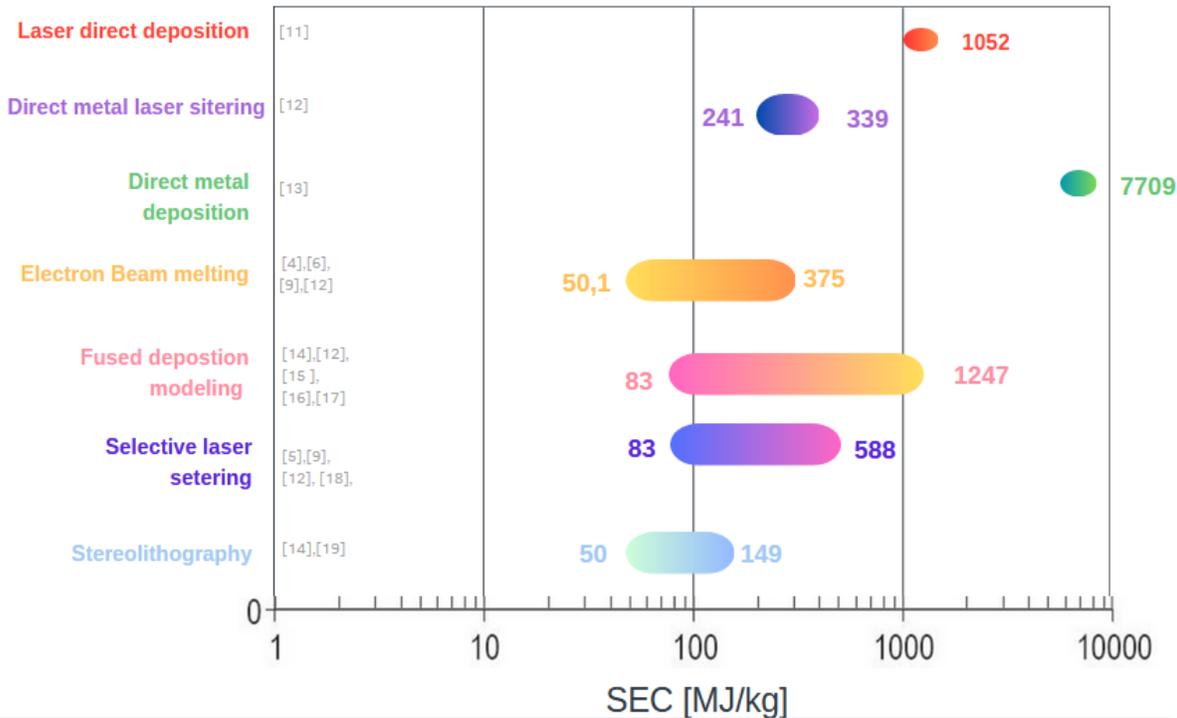
Graphique Energie en fonction du temps



Répartitions énergétiques des différentes phases de l'EBM dans l'article de Cozzolino

- Phase de fabrication qui est la plus énergivore
 - Etape indépendante de l'opérateur
- Les étapes de préparation machine représentent 13,3% de la consommation énergétique
 - Etape dépendante de l'opérateur

SPECIFIC ENERGY CONSUMPTION



Répartitions des SEC selon la technologie de FA



Indicateur énergétique

$$SEC = \frac{\text{Energie consommée}}{\text{Masse déposée}}$$

→ Manque de consensus dans les valeurs

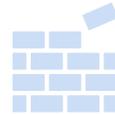


Pourquoi une divergence des données pour un même procédé ?



Introduit par Kara et al.
en 2011 pour l'usinage

$$\text{SEC} = \frac{\text{Energie consommée}}{\text{Masse déposée}}$$

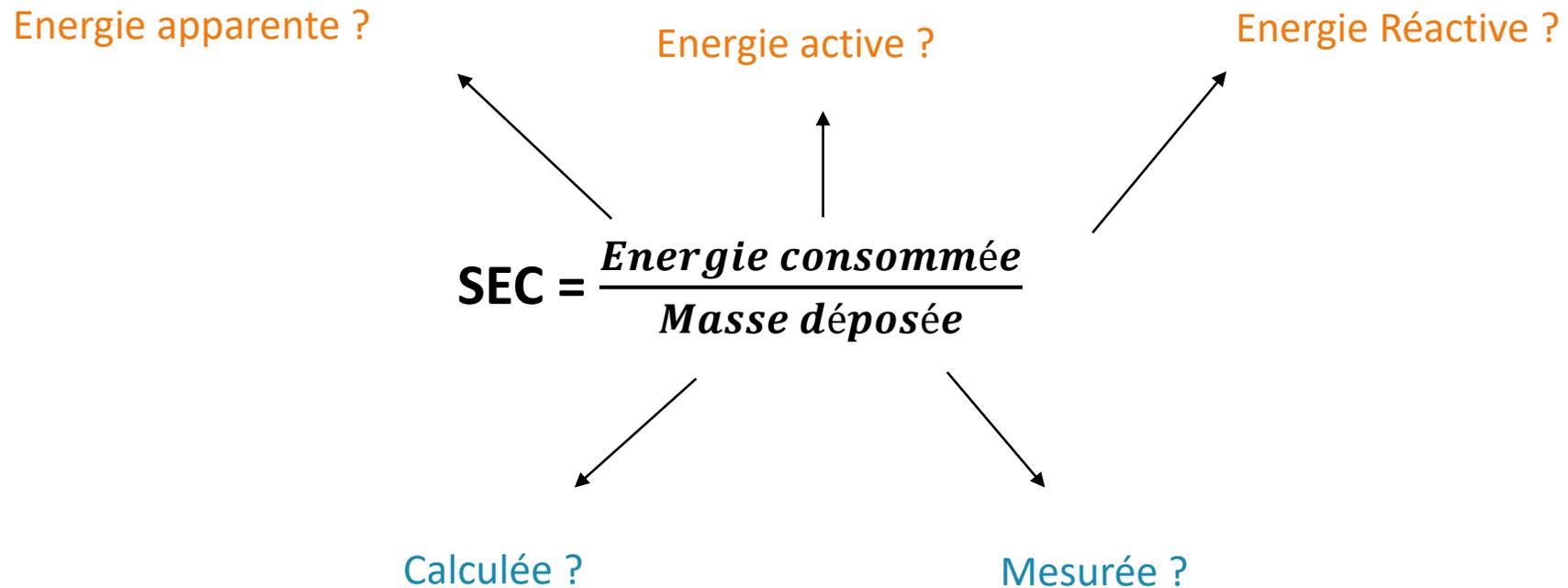


Introduit par Priarone
pour la FA

$$\text{SPE} = \frac{\text{Energie consommée durant la fabrication}}{\text{Masse déposée}}$$

Quelles sont les limites du calcul : Les auteurs parlent-ils de SEC ou SPE ?

Etat de l'art : source de divergence du SEC



Le protocole pour obtenir le SEC n'est pas clairement expliqué

2.

Constitution de la problématique et objectifs de l'étude



Protocole

SEC

Manque d'information sur le type d'énergie (apparente, réactive, active)

Manque de clarté sur l'obtention / calcul d'énergie

Quel modèle de machine ?



Quels éléments pertinents doivent être pris en compte dans la quantification de la consommation énergétique de l'EBM ?



Process

FABRICATION

Phase énergivore : le pourquoi de la question n'est pas traitée

Pas d'étude sur la contribution énergétique de chaque étape de fabrication (ratissage, consolidation, fusion).



La compréhension de stratégie de fabrication pour l'EBM Arcam A1 joue-t-elle un rôle dans la consommation énergétique ?



Conception

MODELE

Modèle d'estimation de l'énergie : non existant pour l'instant



Existe-t-il une modélisation liée aux paramètres géométriques de la pièce qui influe sur la consommation énergétique ?

Comment évaluer la consommation énergétique de la FA dans le but de proposer des pistes pour la réduire ?



Manque d'information sur le type d'énergie (apparente, réactive, active)

Manque de clarté sur l'obtention / calcul d'énergie

Quel modèle de machine ?



- **Proposition les limites du SEC et du SPE pour l'EBM**
- **Élaborer et valider un protocole de mesure énergétique détaillé :**
 - Utilisation d'un analyseur de puissance
 - Basé sur la puissance active



Phase fabrication énergivore : le pourquoi de la question n'est pas traitée



- **Étudier les étapes de fabrication d'une couche :**
 - Dans le détail
 - Identifiant les profils de puissance spécifiques à chaque étape



Modèle d'estimation de l'énergie : non existant pour l'instant



- **Proposer un modèle d'estimation de la consommation énergétique :**
 - Basé sur des paramètres de CAO

3.

Proposition des limites pour le calcul du SEC

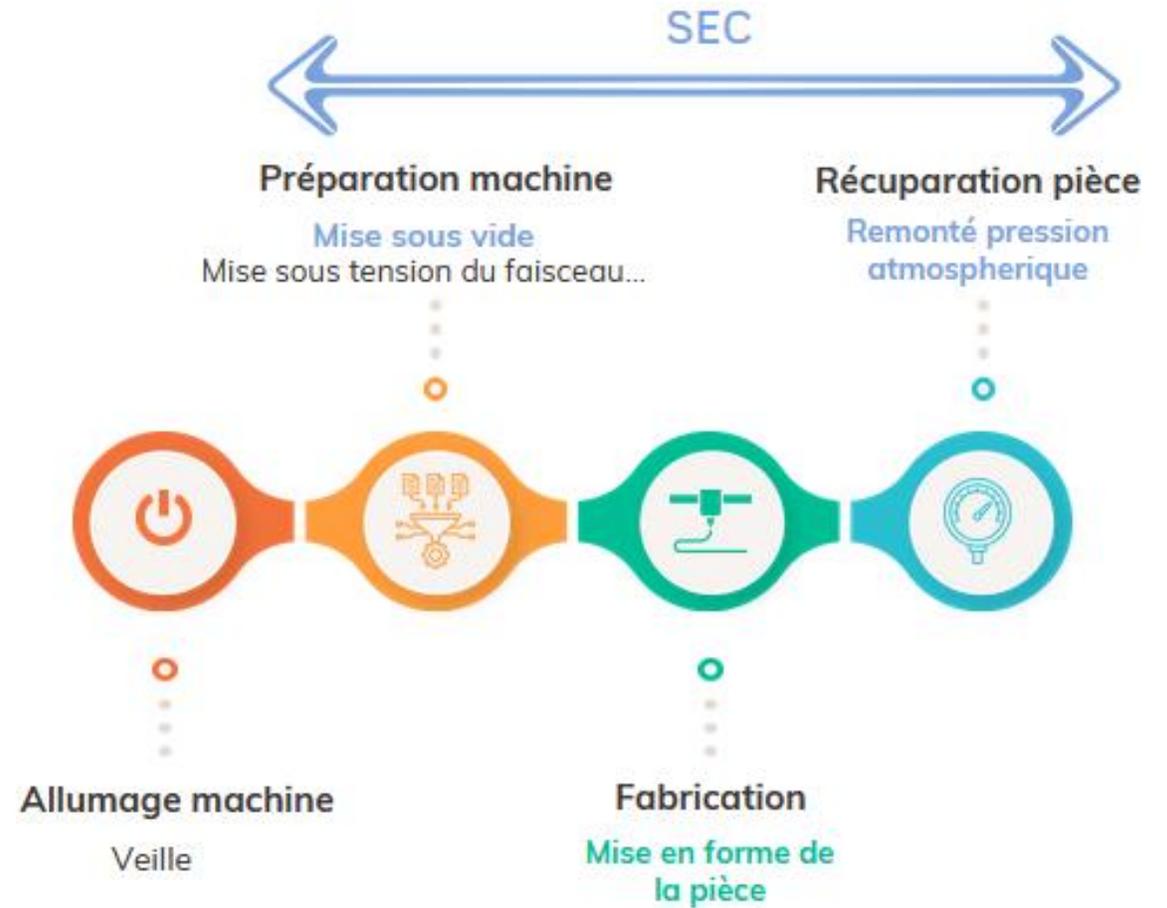
Proposition des limites de SEC

Comparaison avec la littérature

$$SEC = \frac{\text{Energie consommée}}{\text{Masse déposée}}$$

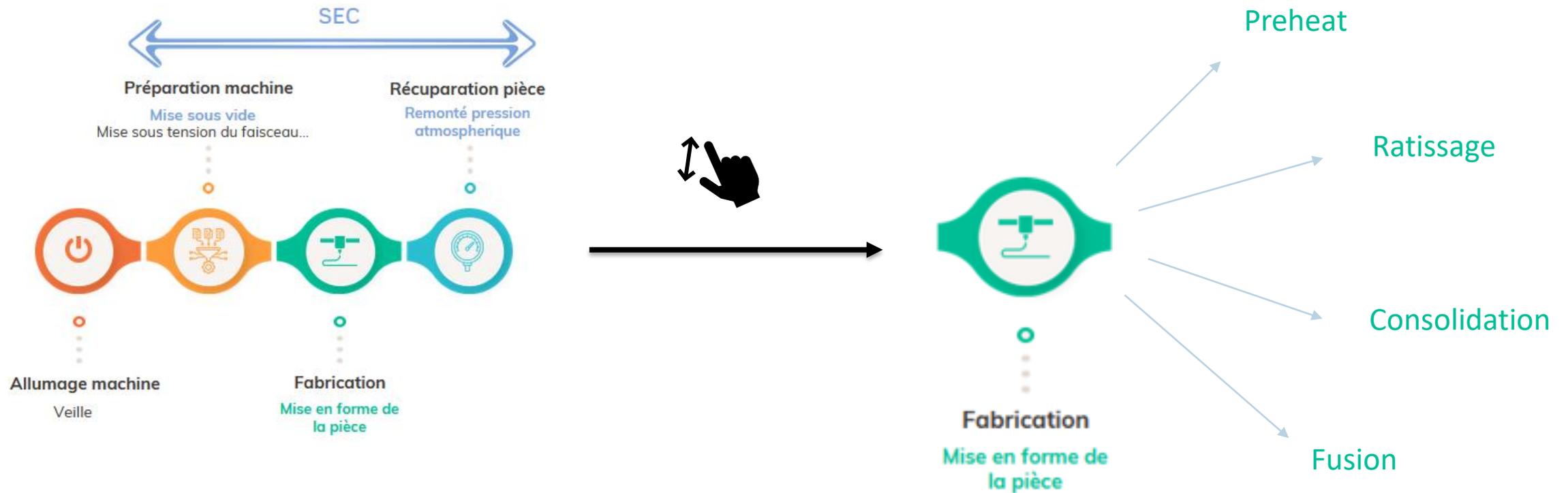
Energie Active mesurée Wh

Masse mesurée kg



Proposition de limites du SEC

Phase de fabrication de l'EBM



Proposition de limites du SEC

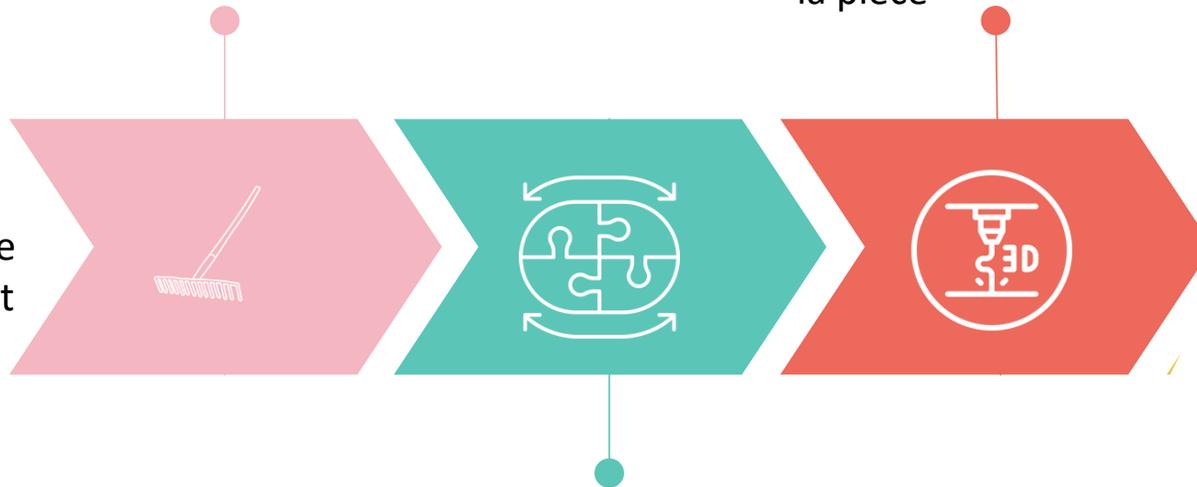
Etapes de mise en forme de la phase de fabrication en EBM

Preheat
Faisceau qui chauffe l'ensemble de la poudre avant de commencer l'impression

Ratissage
Etallement de la Poudre

Fusion
Fusion des contours + intérieures des contours de la pièce

Consolidation
Monter en température de la poudre sur l'ensemble du plateau préparant la fusion



4. Protocole

Protocole expérimental

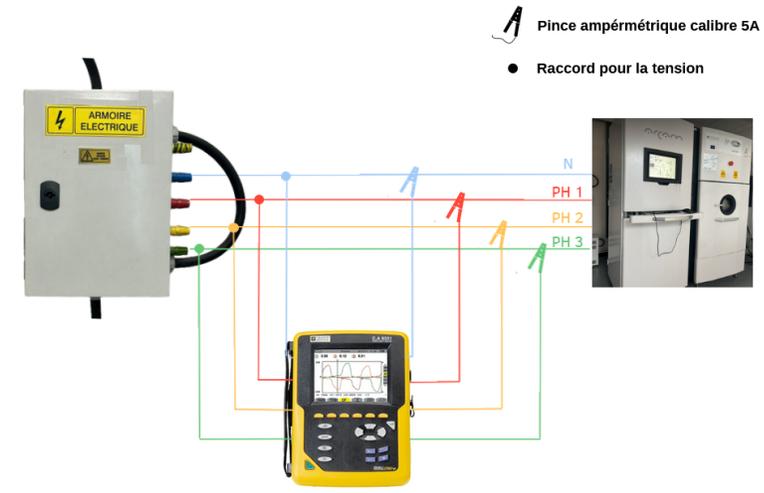
Réaliser 4 pièces de différentes géométries

Mesurer l'énergie consommée à chaque phase

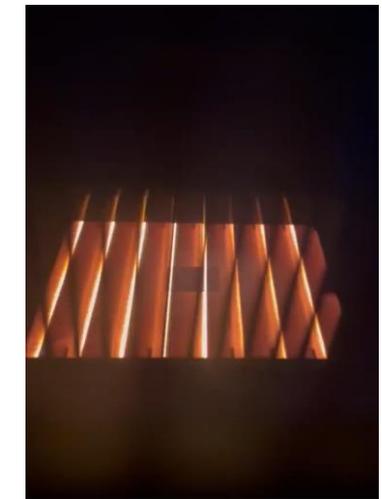


Filmer l'impression et relever chaque durée de chacune des phases

	Illustration	Type de structure
Cône		pleine
Pyramide		
Plongeoir		
Cube Gyroïde		optimisée



Adapter au montage électrique de la machine



Extrait film impression

Montage du câblage électrique de l'analyseur de puissance

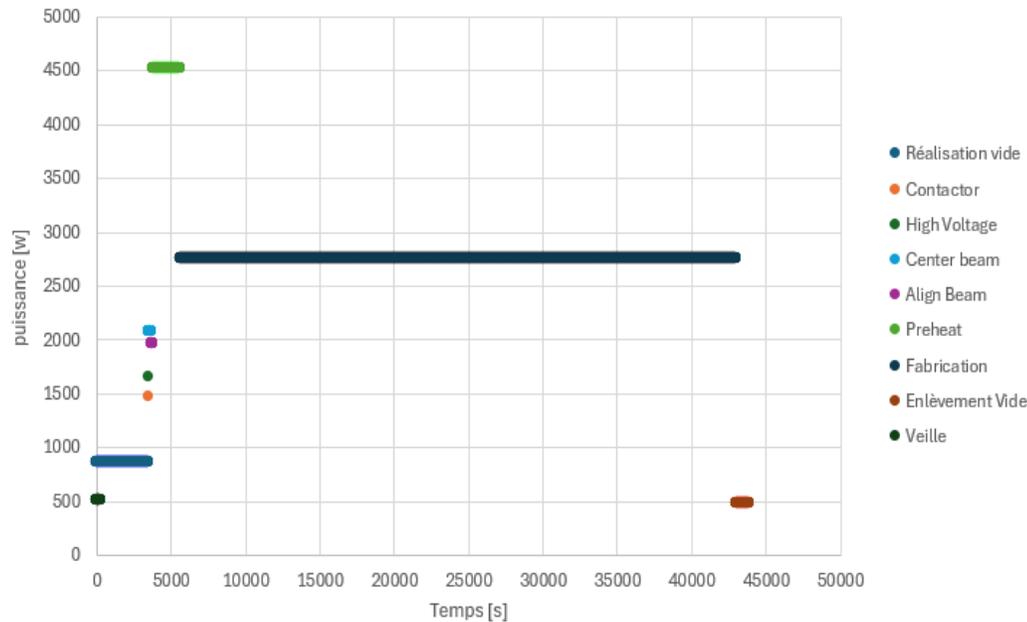
5.

Résultats et analyse

Consommation énergétique des phases

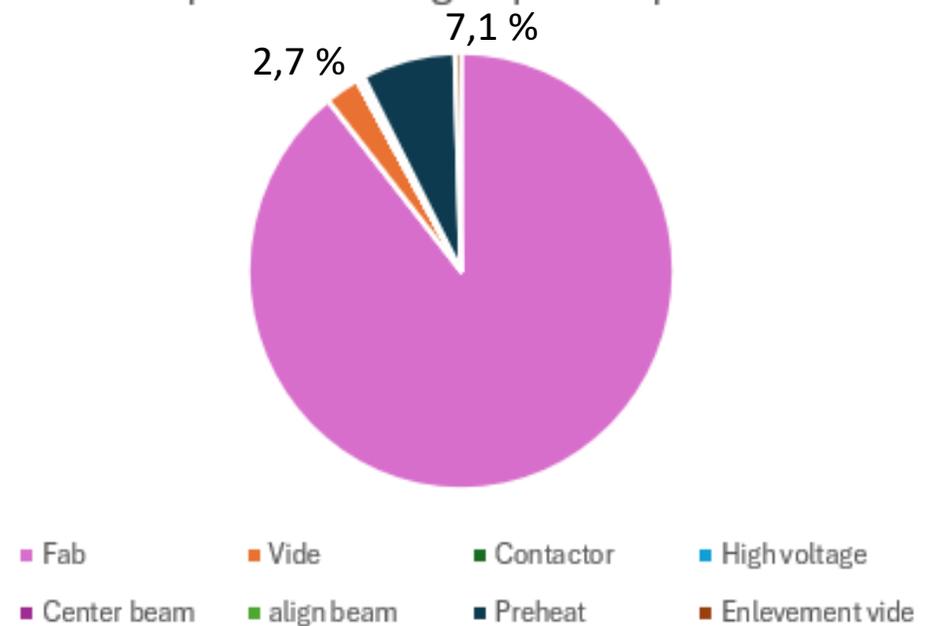


Puissance en fonction du temps pour la construction de la pyramide



Puissance en fonction du temps sur les différentes phases

Répartition énergétique des phases



Répartition de la consommation énergétique en fonction des différentes phases

Phase de fabrication la plus énergivore → en accord avec l'article de Cozzolino

Profil de puissance active pendant la phase de fabrication

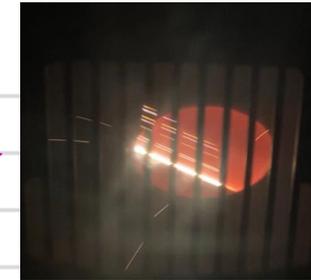
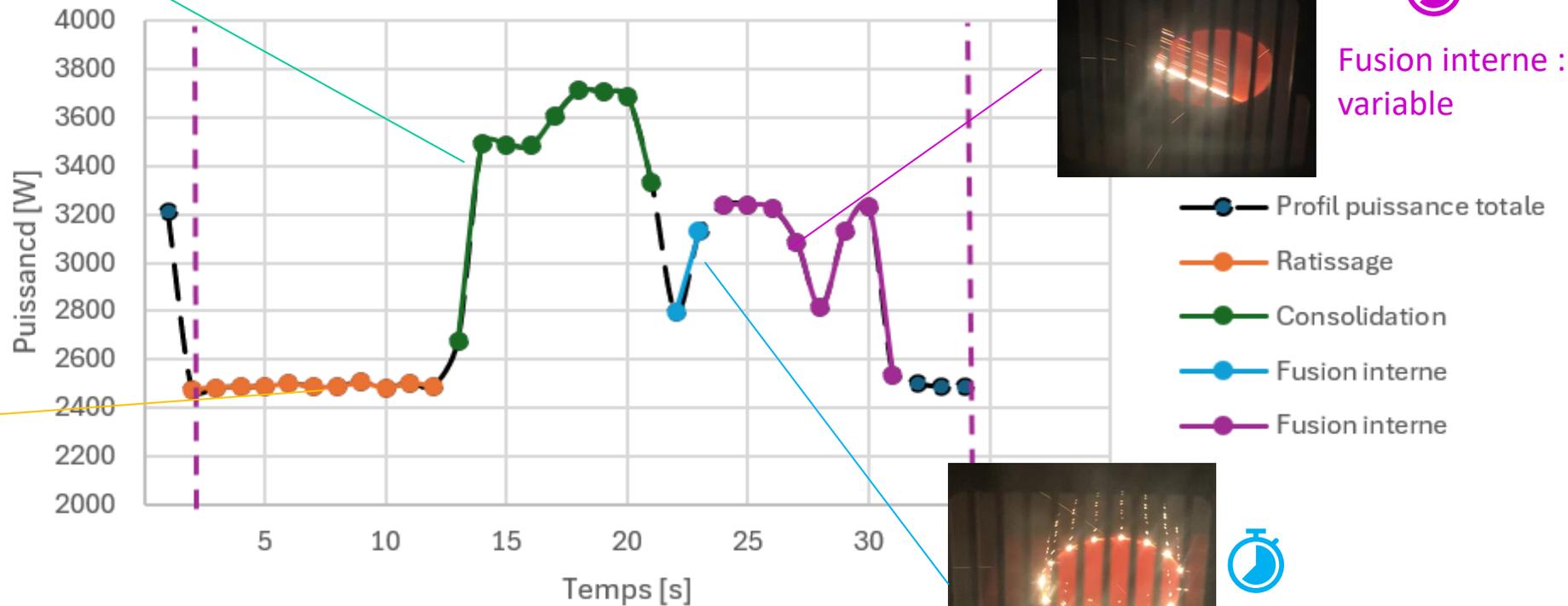


 Consolidation 8s
FIXE



 Rattissage : 11 s
FIXE

Profil de puissance pour la mise en forme d'une surface de 6 347 mm²



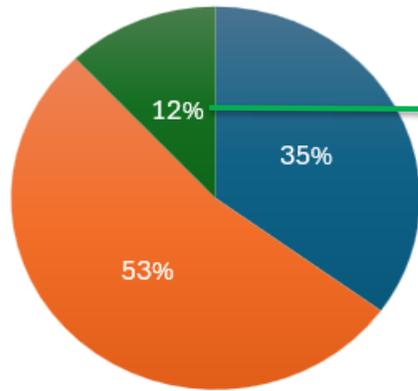
 Fusion interne :
variable



 Fusion contour :
Variable

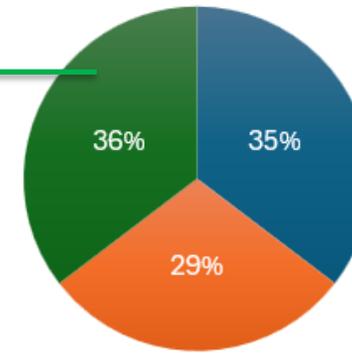
Répartition de l'énergie active pendant la phase de fabrication

Répartition de l'énergie pour une surface de 670 mm²



■ Ratissage ■ Consolidation ■ Fusion

Répartition de l'énergie pour une surface de 6 347 mm²



■ Ratissage ■ Consolidation ■ Fusion

Variable

	Puissance [kW]	Temps [s]	Comportement Energétique (Wh)
Ratissage	1,8 a 2,5	11	fixe
Consolidation	3,5 a 4,2	8	fixe
Fusion	2,5 a 3,8	Variable	variable

Puissance fixe

Facteur temporel VARIABLE

Construction du modèle : calcul cout variable

 18 surfaces étudiées ⇒ Construction d'un modèle mathématique

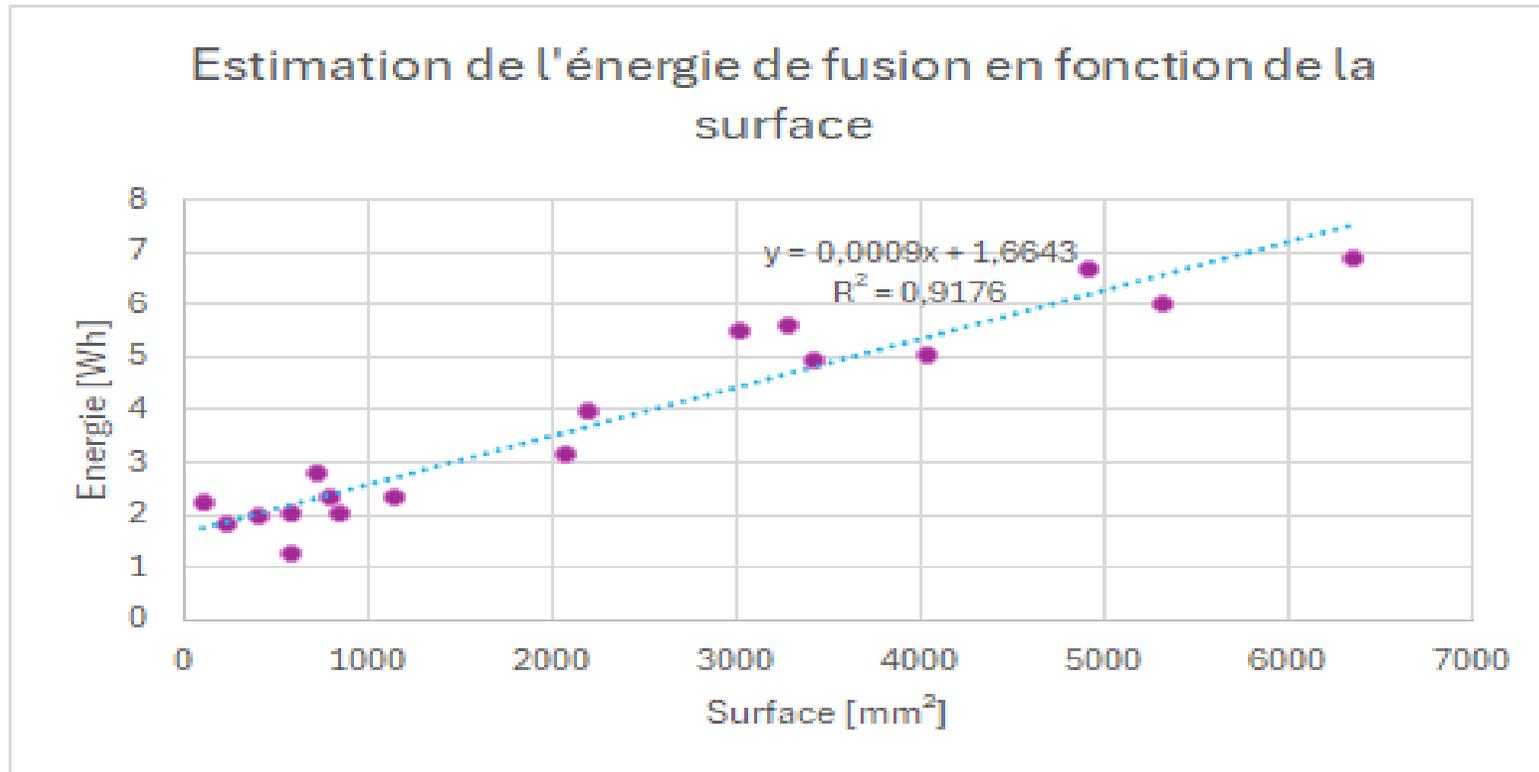


Figure 14 : graphique de l'estimation de l'énergie en fonction de la surface imprimée

Energie : $E=P*t$



Variabilité



Temps (t)



Surface

Construction du modèle : Calcul coût fixe

Pour l'ensemble de la fabrication

$$E_{cout\ fixe\ total} = E_{couche\ fixe} + E_{vide} + E_{remontée\ pression\ atm}$$

 Moyenne sur les 18 surfaces étudiées

		couche		
	Vide	Ratissage	Consolidation	Remontée pression atm
Energie moyenne Wh	600	5,5	7,9	166
Puissance moyenne W	800	1823	3376	500
Temps moyen	45 min	11 s	8 s	20 min

Pour une couche

$$E_{cout\ fixe\ couche} = E_{ratissage} + E_{consolidation}$$

Construction du modèle : Calcul coût fixe

● Coût fixe

● Coût variable

Pour l'ensemble de la production

$$E_{total} = E_{vide} + E_{couche} + E_{remontée\ pression\ atm}$$

Pour une couche

$$E_{couche} = E_{ratissage} + E_{consolidation} + E_{fusion}$$

Généralisation Pour toute la pièce sur les n couches constituant la pièce

Sur l'ensemble du volume

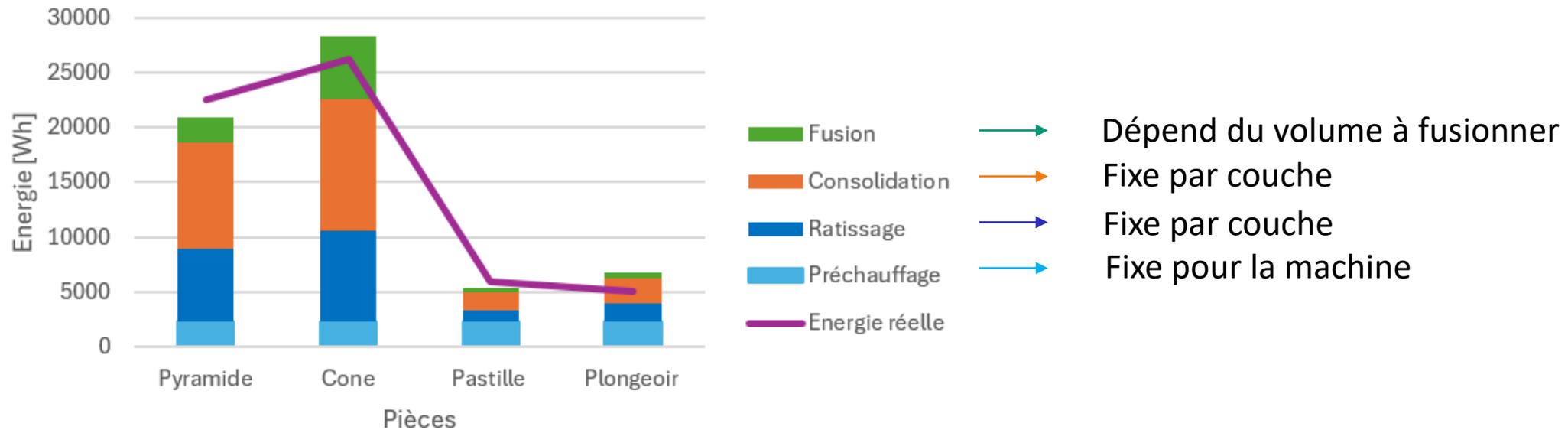
$$E_{couche} = E_{préchauffage} + n * (E_{ratissage} + E_{Consolidation}) + \sum_{i=1}^n 0,0009 * S_i + 1,6634$$

n : nombre de couche

Si : surface à la couche i

Comparaison modèle VS consommation réelle

Comparaison entre le modèle d'évaluation établie et la consommation énergétique réelle



Comparaison du modèle d'estimation avec la consommation réelle

	Pyramide	Cône	Pastille	Plongeoir
Erreur relative [%]	7,1	8,3	9,2	9,1

⇒ Sur des pièces unitaires, le coût fixe par couches est le plus important

Etude EBM : SEC

Piece	Nombre	Type structure	SEC MJ/kg
Cone	1	Pleine	117
Cube	9	Gyroide	284
Pyramide	1	pleine	791

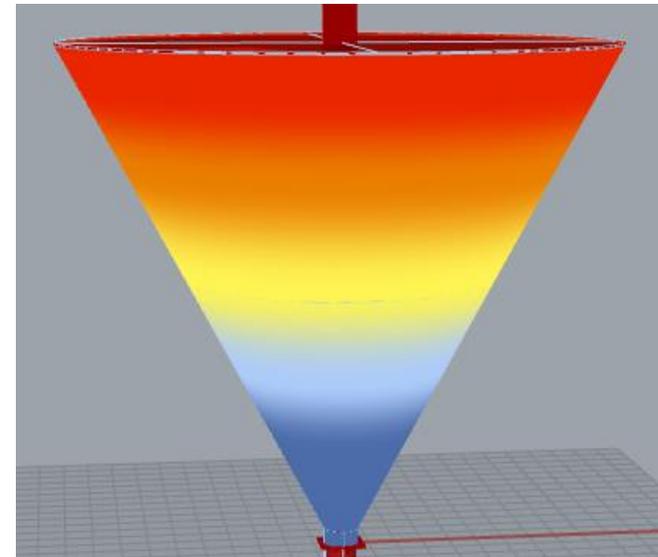
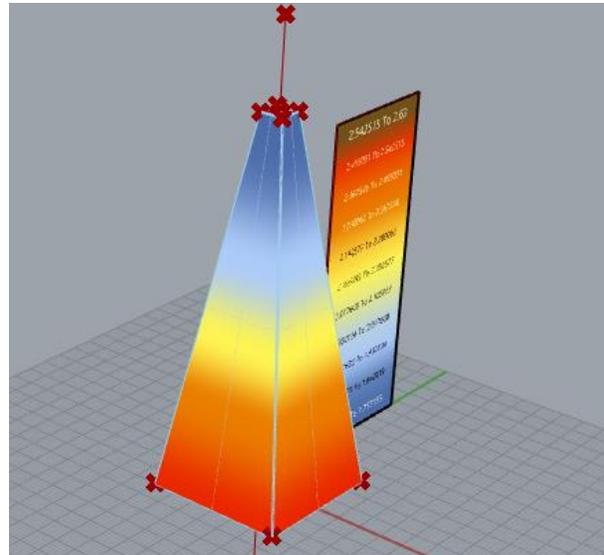
Auteur	Pièce	Machine	SEC [MJ /kg]	Hauteur [mm]	Epaisseur de couche [µm]	Paramètres détaillés	Méthode de calcul pour le SEC	Remarques
Paris (2016)	Turbine	Arcam A1	388	Non précisé	5	non	Energie / masse produite finale	une pièce
Baumers (2011) se base sur l'article de 2010	Araignée	Non précisé	61,2 – 176,67	24	7	non	Non précisé	Single part – Full part
Baumers (2017)	Araignée	Non précisé	60	Non précisé	5	non	non précisé	Full part
Cozzolonio	Cylindre	Arcam AX	50,1	103,38	7	non	Energie / masse produites finale ou Energie de construction / Masse 1 cyl * Nbx cyl	9 échantillons fabriqués

6.

Perspectives et conclusion



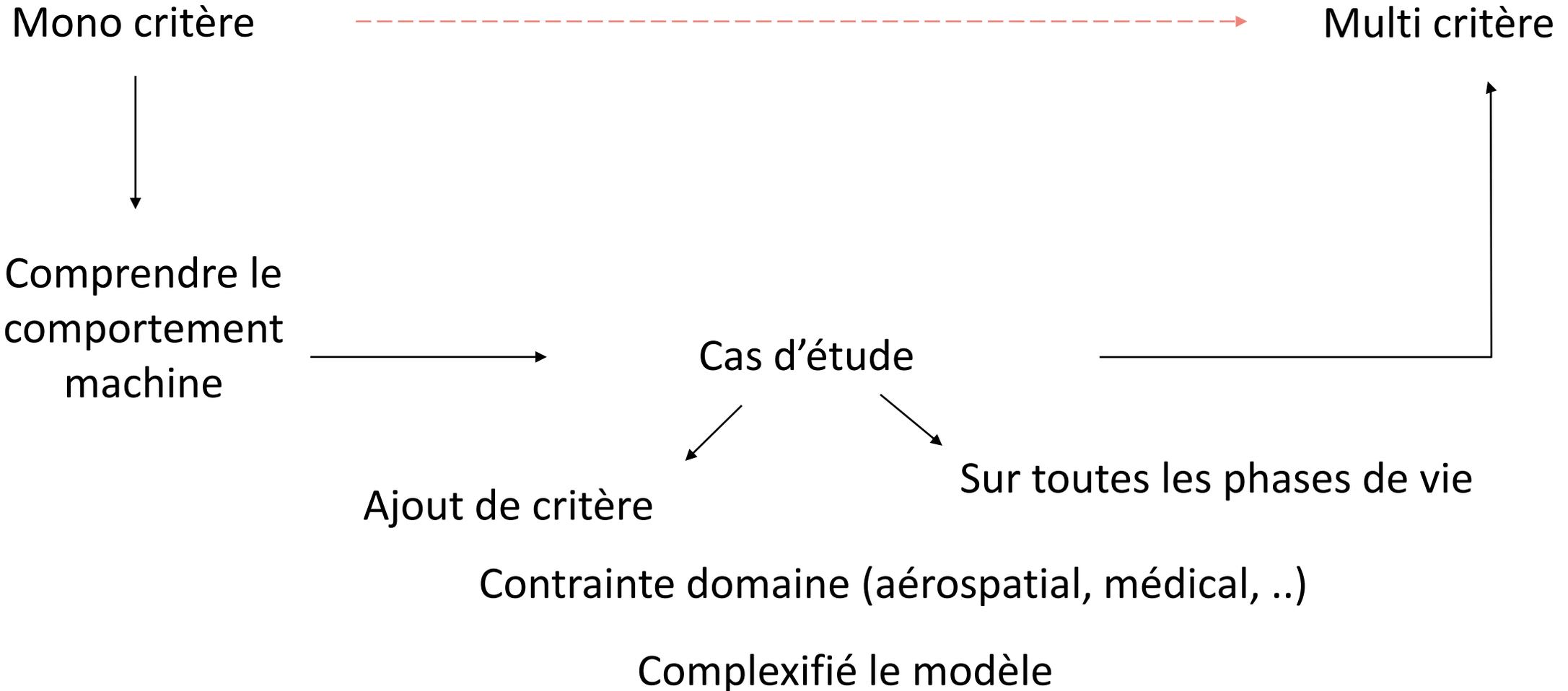
Intégration du modèle dans un logiciel de CAO → au plutôt de la chaine de fabrication



Modèle CAO intégrant la consommation énergétique



Programation : Python + C sharp orienté objet sur Rhino7 + grasshopper



Protocole



Identification des profils de puissance



Intégrer les aspects électrotechniques

Résultats



Coût fixe important par rapport au coût variable pour les pièces unitaires

Recommandation pour répartir les coûts fixe :

- Fabriquer un maximum de pièces dans une couche



VS

- Minimiser la hauteur en optimisant l'orientation



Modèle d'évaluation mono critère en conception fonctionnel

Perspectives



Etude de cas → avoir un modèle multicritère

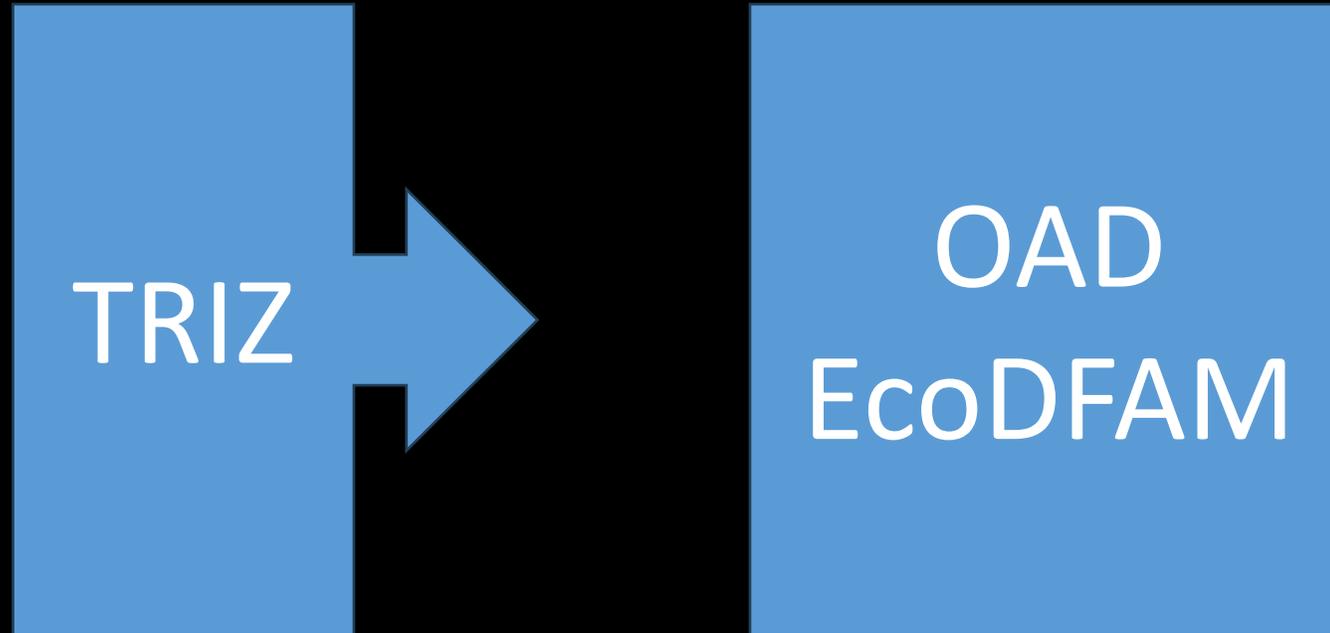
Sommaire

1) Rappel sur les résultats de la 1^{ère} année

2) Déroulement de la 2^{ème} année

- Prolongation de l'étude du SEC et applications à d'autres procédés FA
- Proposition d'un formalisme pour l'outil d'aide à la décision EcoDFAM

3) Perspectives pour la 3^{ème} année



- Élaborée à partir de 1946, par Genrich Altshuller (URSS)



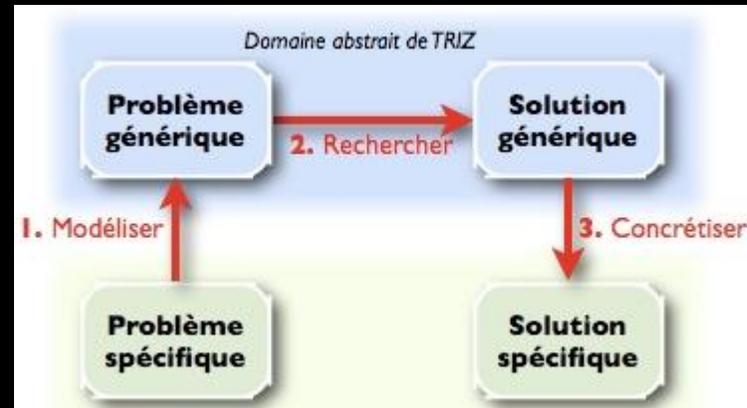
- Analyse de brevets techniques

→ Analogie entre les innovations

→ Propositions de solutions (abstraites) en fonction du problème rencontré

Objectif TRIZ : Démarche de résolution des problèmes inventifs,
par une abstraction du problème (et des solutions)

- Méthodologie d'aide à la décision, de résolution inventive de problème
 - Permet de résoudre des contradictions techniques
 - Philosophie basée sur l'abstraction du problème



Cœur de la démarche TRIZ

- Structure de l'outil
 - Des **contradictions** à partir de **paramètres** techniques
 - Une **matrice** pour orienter vers les principes répondant à la contradiction
 - Des **principes** techniques comme solutions abstraites

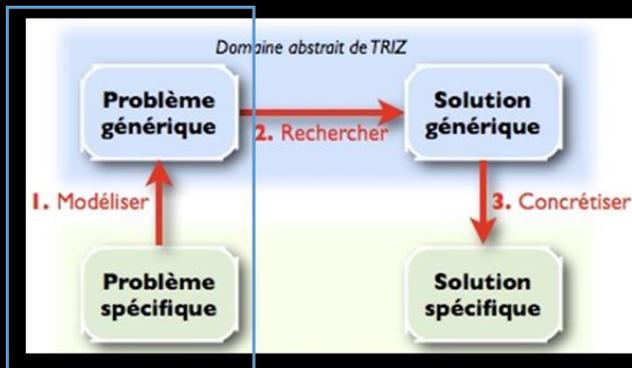
Paramètres techniques - Définitions

1. **Modéliser** : traduire le problème spécifique, en une contradiction entre 2 paramètres

→ Des **contradictions** à partir de **paramètres** techniques

→ un paramètre que l'on souhaite optimiser

→ un paramètre dont on souhaite limiter l'impact négatif



Cœur de la démarche TRIZ

Paramètre technique n°#



Paramètre technique n°#



Une contradiction

Effet positif

à préserver ou à améliorer

Effet négatif

à enlever

1. masse d'un objet mobile
2. masse d'un objet immobile
3. longueur d'un objet mobile
4. longueur d'un objet immobile
5. surface d'un objet mobile
6. surface d'un objet immobile
7. volume d'un objet mobile
8. volume d'un objet immobile
9. vitesse
10. force
11. tension, pression
12. forme
13. stabilité
14. résistance
15. longévité d'un objet mobile
16. longévité d'un objet immobile
17. température
18. brillance
19. énergie dépensée par un objet mobile
20. énergie dépensée par un objet immobile
21. puissance
22. pertes d'énergie
23. pertes de substances
24. pertes d'information
25. pertes de temps
26. quantité de substance
27. fidélité
28. précision de la mesure
29. précision de l'usinage
30. facteurs nuisibles agissant sur l'objet
31. facteurs nuisibles annexes
32. usinabilité
33. facilité d'utilisation
34. aptitude à la réparation
35. adaptabilité
36. complexité de l'appareil
37. complexité de contrôle
38. degré d'automatisation
39. productivité

Paramètre technique - exemple

Réduire le nombre de réparation ou de changement de verre nécessaire



34. Facilité de réparation



36. Complexité de l'objet



Une contradiction

Effet positif
à préserver ou à améliorer

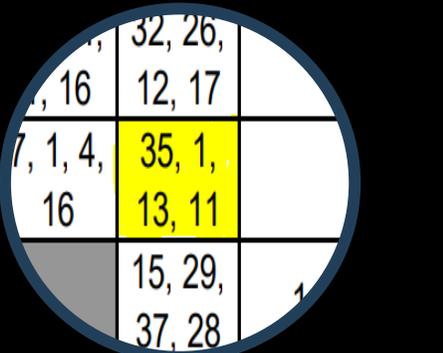
Effet négatif
à enlever

↓
Matrice de contradiction

1. masse d'un objet mobile
2. masse d'un objet immobile
3. longueur d'un objet mobile
4. longueur d'un objet immobile
5. surface d'un objet mobile
6. surface d'un objet immobile
7. volume d'un objet mobile
8. volume d'un objet immobile
9. vitesse
10. force
11. tension, pression
12. forme
13. stabilité
14. résistance
15. longévité d'un objet mobile
16. longévité d'un objet immobile
17. température
18. brillance
19. énergie dépensée par un objet mobile
20. énergie dépensée par un objet immobile
21. puissance
22. pertes d'énergie
23. pertes de substances
24. pertes d'information
25. pertes de temps
26. quantité de substance
27. fidélité
28. précision de la mesure
29. précision de l'usinage
30. facteurs nuisibles agissant sur l'objet
31. facteurs nuisibles annexes
32. usinabilité
33. facilité d'utilisation
34. aptitude à la réparation
35. adaptabilité
36. complexité de l'appareil
37. complexité de contrôle
38. degré d'automatisation
39. productivité

Matrice de contradiction – Exemple

Effet négatif à enlever



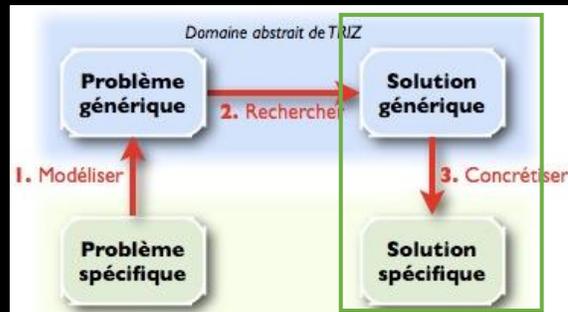
Effet positif à préserver ou à améliorer

Matrice des Contradictions TRIZ - Technology	effet négatif à éliminer		effet positif à préserver ou à améliorer		Effets																																						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39				
1 Poids d'un Objet Mobile			15, 8			29, 17			2, 8	8, 10	10, 36	10, 14	1, 35	28, 27	5, 34		6, 29	19, 1	35, 12		12, 36	6, 2	5, 35	10, 24	10, 35	3, 26	1, 3	28, 27	28, 35	22, 21	22, 35	27, 28	35, 3	2, 27	29, 5	26, 30	28, 29	26, 35	35, 3				
2 Poids d'un Objet Fixe				10, 1		35, 30		5, 35	8, 10	13, 29	13, 10	1, 26	39, 2	2, 27	27, 28	19, 32		18, 19	15, 19	18, 19	5, 8	10, 15	10, 20	19, 6	10, 28	18, 26	10, 1	2, 19	35, 22	22, 37	1, 39	28, 1, 9	6, 13	2, 27	19, 15	1, 10	25, 28	2, 26	1, 28				
3 Longueur d'un Objet Mobile	8, 15			15, 17		7, 17		13, 4, 8	17, 10	1, 8, 35	1, 8	1, 8	8, 35	19	10, 15	19, 32	8, 35	24	1, 35	7, 2	4, 29	1, 24	15, 2	29, 35	10, 14	28, 32	10, 14	28, 32	17, 24	17, 15	1, 29	15, 29	1, 28	14, 15	1, 19	35, 1	17, 24	14, 4	28, 29				
4 Longueur d'un Objet Fixe		35, 28						35, 8	28, 10	1, 14	13, 14	39, 37	15, 14	1, 10	3, 35	3, 25		12, 8	6, 28	10, 26	10, 28	24, 26	30, 29	30, 24	15, 29	32, 28	2, 32	1, 18	15, 17	2, 25	3	1, 35	1, 26	26	30	14	30	14	7, 29				
5 Surface d'un Objet Mobile	2, 17		14, 15					7, 14	29, 30	19, 30	10, 15	5, 34	2, 15	16, 32	19, 10	15, 17	10, 14		19, 10	15, 17	10, 35	2, 39	30, 26	26, 28	26, 28	2, 29	27, 2	22, 1	13, 1	15, 17	15, 13	15, 13	10, 30	14, 1	2, 36	14, 30	10, 26	10, 26					
6 Surface d'un Objet Fixe	2, 17		30, 2			26, 7		17, 7	29, 30	1, 18	10, 15	2, 38	40	6, 3	2, 10	35, 39		2, 10	35, 39	19, 30		19, 30	19, 30	19, 30	19, 30	19, 30	19, 30	19, 30	19, 30	19, 30	19, 30	19, 30	19, 30	19, 30	19, 30	19, 30	19, 30	19, 30	19, 30				
7 Volume d'un Objet Mobile	2, 26		1, 7, 4			1, 7, 4			29, 4	18, 35	6, 35	29, 4	1, 15	28, 10	9, 14	6, 35, 4		35, 6	17, 15	36, 39	2, 22	34, 39	2, 22	34, 39	2, 22	34, 39	2, 22	34, 39	2, 22	34, 39	2, 22	34, 39	2, 22	34, 39	2, 22	34, 39	2, 22	34, 39	2, 22	34, 39			
8 Volume d'un Objet Fixe	35, 10		19, 14		35, 8			2, 18	37, 24	35, 24	7, 2, 35	34, 28	9, 14	17, 15	35, 34	35, 6, 4		30, 6	10, 39	35, 34		35, 16	35, 16	35, 16	35, 16	35, 16	35, 16	35, 16	35, 16	35, 16	35, 16	35, 16	35, 16	35, 16	35, 16	35, 16	35, 16	35, 16	35, 16				
9 Vitesse	2, 28		13, 14			29, 30		7, 29		13, 28	6, 18	35, 15	28, 33	8, 3	3, 19		28, 30	10, 13	8, 15		19, 35	14, 20	10, 13	13, 26	10, 19	11, 35	28, 32	10, 28	1, 28	2, 24	35, 13	32, 28	34, 2	15, 10	10, 28	3, 34	10, 18						
10 Force - Intensité	18, 13		17, 19		29, 10		1, 18	15, 9	2, 36	13, 28	1, 18	10, 35	10, 35	19, 17	1, 16	19, 17	10, 16	1, 16	19, 17	10, 36	14, 15	10, 5	10, 37	14, 29	3, 35	10, 28	1, 35	13, 3	15, 37	1, 28	15, 1	15, 17	10, 18	10, 18	10, 18	10, 18	10, 18	10, 18	10, 18				
11 Tension - Pression	10, 36		13, 29		35, 10		35, 1		10, 15	10, 35	6, 35	10, 35	36, 35	35, 4	35, 33	9, 18	2, 37	35, 39	14, 24	10, 10	10, 36	37, 36	10, 14	10, 36	37, 36	10, 14	3, 35	22, 2	3, 35	22, 2	3, 35	22, 2	3, 35	22, 2	3, 35	22, 2	3, 35	22, 2	3, 35				
12 Forme	8, 10		15, 10		29, 34		5, 34		14, 4	7, 2, 35	35, 15	30, 10	34, 15	33, 1	30, 14	14, 26		22, 14	13, 15	2, 6	4, 2	14, 35	29, 35	14, 10	34, 14	4, 6, 2	14	35, 29	14, 10	28, 32	1, 32	30, 1	2, 13, 1	1, 15	1, 15	1, 15	1, 15	1, 15	1, 15				
13 Stabilité (de la composition) de l'objet	21, 35		26, 39		13, 15		2, 11	39	28, 10	34, 28	33, 15	10, 35	2, 35	14, 2	22, 1	17, 9	13, 27	39, 3	35, 1	32, 3	32, 3	13, 19	27, 4	28, 31	32, 35	14, 2	2, 14	30, 18	3, 35	30, 18	3, 35	30, 18	3, 35	30, 18	3, 35	30, 18	3, 35	30, 18	3, 35				
14 Force - Résistance	1, 8		40, 26		1, 15		15, 14	3, 34	9, 40	10, 15	9, 14	8, 13	10, 18	10, 3	10, 30	13, 17	27, 3	30, 10	35, 19	35, 19	35, 19	35, 19	35, 19	35, 19	35, 19	35, 19	35, 19	35, 19	35, 19	35, 19	35, 19	35, 19	35, 19	35, 19	35, 19	35, 19	35, 19	35, 19	35, 19				
15 Durée d'Action d'un Objet Mobile	19, 1		2, 19, 9		3, 17		19, 30		3, 35, 5	19, 27	19, 27	19, 27	19, 27	19, 27	19, 27	19, 27		19, 27	19, 27	19, 27	19, 27	19, 27	19, 27	19, 27	19, 27	19, 27	19, 27	19, 27	19, 27	19, 27	19, 27	19, 27	19, 27	19, 27	19, 27	19, 27	19, 27	19, 27	19, 27				
16 Durée d'Action d'un Objet Immobil	6, 27		19, 16		1, 40		35, 34		38		2, 28	35, 10	35, 39	14, 22	1, 35	10, 30	19, 13	19, 18	32, 30	19, 15		16	21, 17	21, 36	35, 28	3, 17	21, 36	35, 28	3, 17	21, 36	35, 28	3, 17	21, 36	35, 28	3, 17	21, 36	35, 28	3, 17	21, 36				
17 Température	36, 22		22, 35		15, 19		15, 19	3, 35	35, 38	34, 39	35, 6, 4	2, 28	35, 10	35, 39	14, 22	1, 35	10, 30	19, 13	19, 18	32, 30	19, 15		16	21, 17	21, 36	35, 28	3, 17	21, 36	35, 28	3, 17	21, 36	35, 28	3, 17	21, 36	35, 28	3, 17	21, 36	35, 28					
18 Clarté - Illumination - Brillance	19, 1		2, 35		19, 32		10		2, 13	19, 32	2, 13	19, 32	2, 13	19, 32	2, 13	19, 32		32, 35	32, 1	32, 1	32, 1	32, 1	32, 1	32, 1	32, 1	32, 1	32, 1	32, 1	32, 1	32, 1	32, 1	32, 1	32, 1	32, 1	32, 1	32, 1	32, 1	32, 1	32, 1				
19 Utilisation d'Energie par un Objet Mobile	12, 18		12, 28		15, 19		35, 13		18	8, 35	16, 28	23, 14	12, 2	19, 13	5, 19	28, 35	6, 18	19, 24	2, 15	19, 18	12, 22	35, 24	19, 18	12, 22	35, 24	19, 18	12, 22	35, 24	19, 18	12, 22	35, 24	19, 18	12, 22	35, 24	19, 18	12, 22	35, 24	19, 18	12, 22				
20 Utilisation d'Energie par un Objet Fixe	19, 9		19, 9		1, 10		17, 32		35, 6	30, 6	15, 35	26, 2	22, 10	29, 14	10, 19	19, 35	2, 14	16, 6	16, 6	10, 35	28, 22	4, 34	19, 24	32, 15	32, 15	32, 15	32, 15	32, 15	32, 15	32, 15	32, 15	32, 15	32, 15	32, 15	32, 15	32, 15	32, 15	32, 15	32, 15				
21 Puissance	8, 36		19, 26		1, 10		17, 32		35, 6	30, 6	15, 35	26, 2	22, 10	29, 14	10, 19	19, 35	2, 14	16, 6	16, 6	10, 35	28, 22	4, 34	19, 24	32, 15	32, 15	32, 15	32, 15	32, 15	32, 15	32, 15	32, 15	32, 15	32, 15	32, 15	32, 15	32, 15	32, 15	32, 15					
22 Perte d'Energie	15, 6		19, 6		7, 2, 6		13	6, 38, 7	19, 28	17, 7	7, 18	7, 18	7, 18	7, 18	7, 18	7, 18		3, 38	35, 27	19, 10		10, 18	10, 18	10, 18	10, 18	10, 18	10, 18	10, 18	10, 18	10, 18	10, 18	10, 18	10, 18	10, 18	10, 18	10, 18	10, 18	10, 18					
23 Perte de Matière - Substance	35, 6		35, 6		14, 29		10, 31		19, 31	3, 39	10, 13	14, 15	3, 36	29, 35	2, 14	35, 28	28, 27	27, 16	21, 36	35, 18	28, 27	27, 16	21, 36	35, 18	28, 27	27, 16	21, 36	35, 18	28, 27	27, 16	21, 36	35, 18	28, 27	27, 16	21, 36	35, 18	28, 27	27, 16					
24 Perte d'Information	10, 24		10, 35		1, 26		26	30, 26	30, 16	2, 22	26, 32	10		10	10	10		19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19				
25 Perte de Temps	10, 20		10, 20		15, 2		30, 24		26, 4	10, 35	2, 5	35, 16	10, 37	3, 7	4, 10	25, 3	29, 3	20, 10	28, 20	35, 29	1, 19	35, 38	1	35, 20	10, 6	35, 18	24, 26	35, 38	24, 26	35, 38	24, 26	35, 38	24, 26	35, 38	24, 26	35, 38	24, 26	35, 38					
26 Quantité de Matière - Substance	35, 8		27, 26		29, 14		15, 14		15, 20		35, 29	35, 14	10, 36	35, 14	15, 2	14, 35	3, 35	3, 35	3, 17	34, 29	3, 35	7, 18	6, 3	24, 26	35, 30	18, 3	13, 2	33, 30	35, 33	3, 35	29, 1	35, 29	2, 32	15, 3	3, 13	3, 27	8, 35						
27 Fiabilité	3, 8		3, 10		15, 9		15, 29		17, 10	3, 35	3, 10	2, 35	21, 35	10, 24	35, 1	2, 35	34, 27	3, 35	11, 32	21, 11	31, 1	27, 19	36, 23	26, 31	35, 1	35, 29	30, 26	4, 40, 3	4, 40, 3	4, 40, 3	4, 40, 3	4, 40, 3	4, 40, 3	4, 40, 3	4, 40, 3	4, 40, 3	4, 40, 3	4, 40, 3					
28 Précision de Mesure	32, 35		28, 35		28, 26		32, 28		28, 28	32, 13	28, 13	32, 2	6, 28	6, 28	6, 28	6, 28	6, 28	6, 28	6, 28	6, 28	6, 28	6, 28	6, 28	6, 28	6, 28	6, 28	6, 28	6, 28	6, 28	6, 28	6, 28	6, 28	6, 28	6, 28	6, 28	6, 28	6, 28	6, 28					
29 Précision de Fabrication - Réalisation	28, 32		28, 35		10, 28		2, 32		28, 33	2, 29	28, 10	32, 28	28, 19	3, 35	40	30		32, 2	13, 32	32, 2	13, 32	32, 2	13, 32	32, 2	13, 32	32, 2	13, 32	32, 2	13, 32	32, 2	13, 32	32, 2	13, 32	32, 2	13, 32	32, 2	13, 32	32, 2					
30 Effet ou Facteur Nocif - Négatif affectant l'objet	22, 21		2, 22		17, 1		1, 18		22, 1	27, 2	22, 23	34, 39	21, 22	1																													

Principes d'innovation - Définitions

3. Concrétiser

→ Des **principes** techniques comme pistes de solutions



Cœur de la démarche TRIZ

- | | |
|----------------------------------|-------------------------------|
| 1. Segmentation | 21. Vitesse élevée |
| 2. Extraction | 22. Conversion |
| 3. Qualité locale | 23. Rétroaction |
| 4. Asymétrie | 24. Intermédiaire |
| 5. Fusion | 25. Self-service |
| 6. Multifonctions | 26. Copie |
| 7. Inclusion | 27. Éphémère et bon marché |
| 8. Contrepoids | 28. Interaction non mécanique |
| 9. Action contraire préliminaire | 29. Fluide |
| 10. Action préliminaire | 30. Membrane flexible |
| 11. Protection préalable | 31. Porosité |
| 12. Équipotentiel | 32. Changement de couleur |
| 13. Inversion | 33. Homogénéité |
| 14. Courbe | 34. Rejet et régénération |
| 15. Dynamisme | 35. Valeur d'un paramètre |
| 16. Excessif ou partiel | 36. Phase de transition |
| 17. Autre dimension | 37. Dilatation |
| 18. Vibration | 38. Oxydants puissants |
| 19. Action périodique | 39. Éléments inertes |
| 20. Continuité | 40. Composites |

Principes d'innovation – Exemple

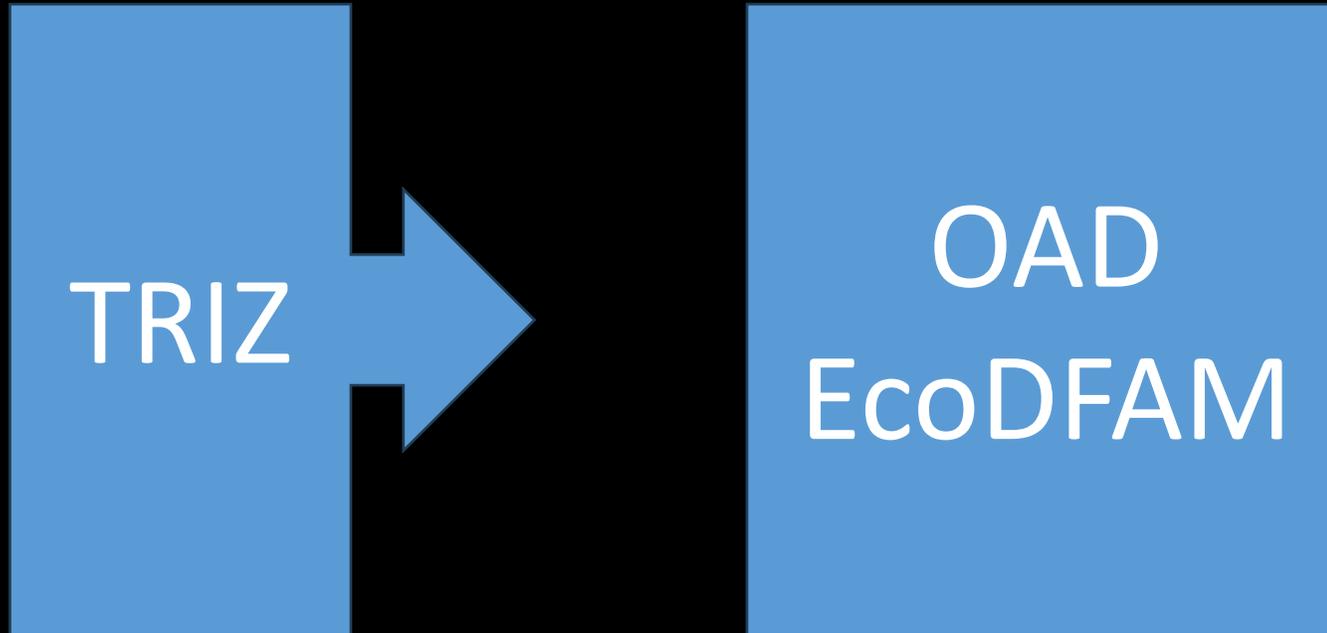
16	32, 26, 12, 17	
7, 1, 4, 16	35, 1, 13, 11	
	15, 29, 37, 28	



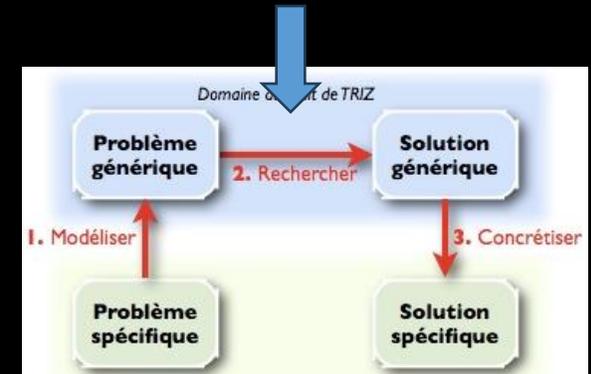
- | | |
|----------------------------------|----------------------------------|
| 1. Segmentation | 21. Vitesse élevée |
| 2. Extraction | 22. Conversion |
| 3. Qualité locale | 23. Rétroaction |
| 4. Asymétrie | 24. Intermédiaire |
| 5. Fusion | 25. Self-service |
| 6. Multifonctions | 26. Copie |
| 7. Inclusion | 27. Éphémère et bon marché |
| 8. Contrepoids | 28. Interaction non mécanique |
| 9. Action contraire préliminaire | 29. Fluide |
| 10. Action préliminaire | 30. Membrane flexible |
| 11. Protection préalable | 31. Porosité |
| 12. Équipotential | 32. Changement de couleur |
| 13. Inversion | 33. Homogénéité |
| 14. Courbe | 34. Rejet et régénération |
| 15. Dynamisme | 35. Valeur d'un paramètre |
| 16. Excessif ou partiel | 36. Phase de transition |
| 17. Autre dimension | 37. Dilatation |
| 18. Vibration | 38. Oxydants puissants |
| 19. Action périodique | 39. Éléments inertes |
| 20. Continuité | 40. Composites |

1. Segmentation





Banque de cas d'étude de FA
« écoproformante »



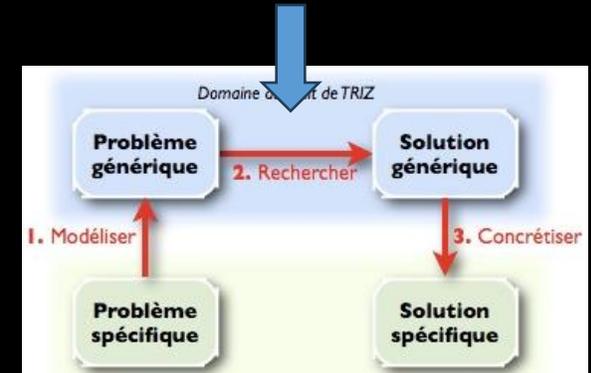
Objectifs

Identifier des règles de (re)conception pour la fabrication additive métallique suivant des critères techniques et environnementaux

Sous-objectifs :

1. **Modéliser** = Sélection **d'exemples de reconception** vers la FA
2. **Rechercher** = **Identification des principes** de reconception utilisées
3. **Concrétiser** = Analyse/classification de la **performance des principes** (critères techniques et environnementaux)

Banque de cas d'étude de FA
« écopperformante »



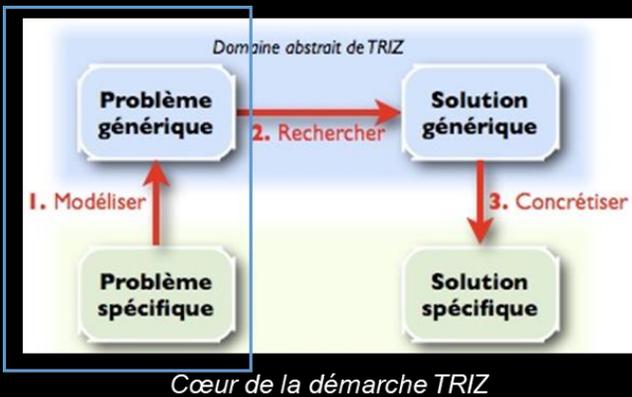
Point de départ : Cas d'études d'usages de la FA

Quelle est la raison du transfert vers la fabrication additive ?

- 1. Optimisation masse** → réduction de la consommation de matière
- 2. Intégration** → réduction du nombre de pièce et de l'assemblage
- 3. Personnalisation** → réalisation de géométrie complexe
- 4. Maintenabilité** → maintenir/simplifier la chaîne de fabrication
- 5. Prototypage** → fabrication pré-série
- 6. Optimisation énergie** → réduction de la consommation énergétique
- 7. Logistique** → flexibilité du lieu de fabrication
- 8. Réparation** → réparation de pièce

Identification des paramètres de reconception

Suivant quels paramètres évaluer la pertinence de la reconception ?



- I. Masse d'un objet
- II. Longueur d'un objet
- III. Volume d'un objet
- IV. Forme d'un objet
- V. Longévité d'un objet
- VI. Qualité
- VII. Durée de fabrication
- VIII. Facilité de fabrication
- IX. Précision de fabrication
- X. Maintenabilité
- XI. Ressources abiotiques
- XII. Qualité écosystèmes
- XIII. Santé humaine
- XIV. Consommation énergétique

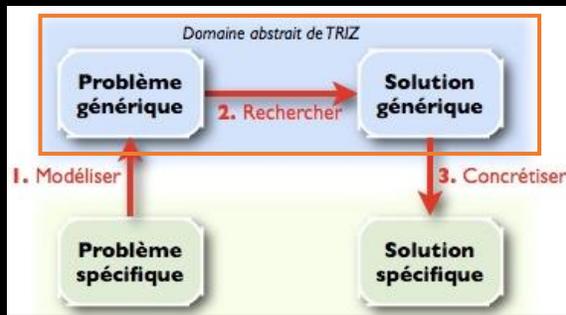
Paramètres techniques objet

Paramètres de fabrication

Paramètres environnementaux

Identification des principes de reconception utilisés

Principes de conception FA à disposition du concepteur



Cœur de la démarche TRIZ

A – Matériaux

1. Choix du matériau
2. État de la matière
3. Matériaux recyclables
4. Recycler/réutiliser matières non-consommées
5. Multi-matériaux

B – Procédés

1. Choix du procédé de FA
2. Remplacer conventionnel par FA
3. Hybride conventionnel + FA

C – Logistique

1. Réduction du packaging/packageging intégré
2. Rapprocher les sites
3. Fabrication juste-à-temps

D - Fabrication

1. Stratégie d'impression
2. Fabrication multi-pièces
3. Monitoring/smart manufacturing

E – Retrait de la matière

1. Optimisation topologique
2. Structure lattice
3. « Arbitraire »
4. Perçage
5. Cavités

F – Géométrie pièce

1. Fusion (assemblage)
2. Capabilités machines
3. Géométrie « FA compatible »
4. Impression 4D

Analyse/classification de la **performance des principes** (critères techniques et environnementaux)

B – Procédés

2. Remplacer conventionnel par FA

Usages fréquents	<p><i>Théoriquement tous</i></p> <ol style="list-style-type: none"> Optimisation de masse → liberté géométrique de la FA Intégration → liberté géométrique de la FA ET mise en forme en 1 seule étape Personnalisation → liberté géométrique de la FA Maintenabilité → fabrication d'une pièce unique plus rapide et plus simple en FA Prototypage → fabrication d'une pièce unique plus rapide et plus simple en FA Optimisation énergétique → dépend des opérations de fabrication, du matériau et de la géométrie de la pièce Logistique → liberté de lieu de fabrication offerte par la FA Réparation → liberté de lieu de fabrication offerte par la FA → fabrication d'une pièce unique plus rapide et plus simple en FA → principe additif de la FA
Impacts positifs potentiels sur les paramètres	<ul style="list-style-type: none"> [I] Masse d'un objet [IV] Forme d'un objet [VI] Durée de fabrication (pièce unique) [VII] Facilité de fabrication [VIII] Facilité de distribution [XI] Maintenabilité [XIII] Ressources abiotiques [XV] Santé humaine
Impacts négatifs potentiels sur les paramètres	<ul style="list-style-type: none"> [V] Longévité de l'objet [VI] Durée de fabrication (série) [IX] Qualité [X] Précision de fabrication [XV] Santé humaine
Exemples	<ul style="list-style-type: none"> #1-3 → Comparaison L-PBF / usinage (pièces coulées ou massives) #4 → Comparaison L-PBF / soudage TIG #5-6 → Comparaison usinage, EBM et DMLS #7 → L-PBF / soustractif (non spécifié) #9 → Fabrication CM n'est plus possible (toxicité), reconception pour SLM #10 → Perçage vs SLM #11 → Reconception pour SLM #12-13 → Fraisage vs SLM

Dans quel but ?

Pour quel gain ?

À quel risque ?

Comment l'utiliser ?

Consommation de matière : [-90% ; +27%]

Masse de l'objet : [-91% ; 0%]

C – Logistique

1. Réduction du packaging/packaging

Usages fréquents	<ol style="list-style-type: none"> Optimisation masse → réduction de la masse du packaging (voir suppression) Intégration → permet la réalisation du packaging directement sur la pièce et pendant la fabrication de la pièce Personnalisation → liberté géométrique offerte par la FA Optimisation énergie → réduction du nombre d'opérations grâce à la FA et donc de leurs consommations Logistique → réduction de la masse et du volume à transporter
Impacts positifs potentiels sur les paramètres	<ul style="list-style-type: none"> [I] Masse d'un objet du packaging [II] Longueur d'un objet du packaging [III] Volume d'un objet du packaging [IV] Forme d'un objet du packaging [V] Longévité d'un objet du packaging [VI] Durée de fabrication [VII] Facilité de fabrication [VIII] Facilité de distribution [XI] Maintenabilité [XIII] Ressources abiotiques [XVI] Consommation énergétique
Impacts négatifs potentiels sur les paramètres	<ul style="list-style-type: none"> [VI] Durée de fabrication [VII] Facilité de fabrication [XVI] Consommation énergétique
Exemples	<ul style="list-style-type: none"> #16 → utilisation du support comme protection #18 → inscription du code barre directement sur l'objet métallique

Poursuites

- Utilisation de l'outil

- Quels outils ? (TRIZ, ASIT, autre)
- Comment amener le concepteur à considérer les principes inconnus ?



Développement de l'outil

- Critères

- Ajout/combinaison/séparation de certains critères (ex: objet mobile/immobile, réparabilité...)
- Manque de données/informations/exemples (XIV. Qualités des écosystèmes et XV. Santé humaine)



Base de données
ACV FA

- Principes

- Principes manquants ?
- Modifier la répartition des principes par familles
- Manque d'exemples pour certains principes (ex: recyclage, impression 4D, monitoring...)
- Manque d'exemples négatifs et/ou industriels



Applicabilité et
tests de l'outil

Sommaire

- 1) Rappel sur les résultats de la 1^{ère} année
- 2) Déroulement de la 2^{ème} année
- 3) Perspectives pour la 3^{ème} année**

- Version consolidée et utilisable de la base de données ACV FA
 - Master ESTIA : extension du périmètre d'études process (pré – post process)
 - Master COSMER ? : développement de l'outil EcoDFAM
- Elaboration et diffusion de l'outil d'aide à la décision
 - Master CETIM

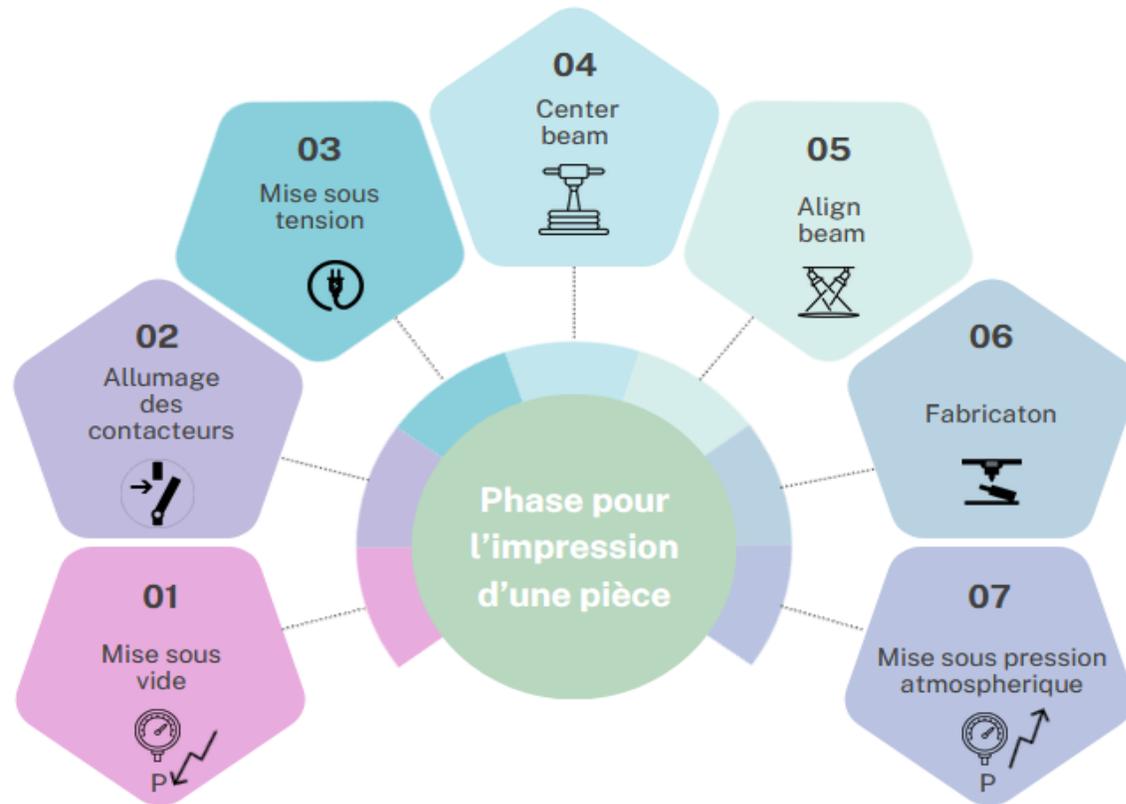


PRCI EcoDFAM 2022 - 2025
Outil d'aide à la décision pour l'écoconception
de pièces obtenues par fabrication additive

- **En quoi la fabrication additive peut nous amener à réduire notre impact environnemental ?**



MERCI POUR VOTRE ATTENTION !!!



Matériaux :
Poudre de Titane Ti6Al4V

