

# ÉVALUATION ET MODÉLISATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX EN FABRICATION DIRECTE, APPLICATION À LA PROJECTION DE POUDRE

**Florent Le Bourhis**

florent.le-bourhis@ircsyn.ec-nantes.fr

**Olivier Kerbrat**

olivier.kerbrat@ircsyn.ec-nantes.fr

**Jean-Yves Hascoët**

jean-yves.hascoet@ircsyn.ec-nantes.fr

**Pascal Mognol**

pascal.mognol@ircsyn.ec-nantes.fr

Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes,  
Equipe MO2P (UMR 6597), 1 Rue de la Noë, 44321 NANTES

## RESUME

Les procédés de fabrication directe permettent aujourd'hui d'obtenir des pièces fonctionnelles à fortes valeurs ajoutées. Dans un même temps, l'environnement devient un enjeu sociétal majeur et la législation concernant l'environnement devient de plus en plus prééminente (Normes ISO 14 0XX). À ce jour l'impact environnemental de ces nouveaux procédés n'est pas connu et doit être évalué quantitativement afin de faciliter son " acceptation " dans le monde industriel.

Quelques travaux ont été menés sur les consommations électriques des machines (consommation en veille, lors de la fabrication d'une pièce, consommation de l'unité de chauffe etc) mais on ne trouve que peu d'études globales prenant en compte l'ensemble des flux environnementaux (matériaux, énergie, fluide) sur l'ensemble du cycle de fabrication. Il alors est proposé la mise en place d'une méthodologie permettant de prendre en compte à la fois la consommation énergétique de la machine, mais également la consommation de fluide et de matière. Cette méthode couple l'approche globale

nécessaire dans la démarche de développement durable et l'évaluation fine des flux au niveau de la machine.

Cette étude consiste donc à développer un modèle de prédiction de la consommation des flux lors de la fabrication d'une pièce à partir des trajectoires de fabrication définies par l'analyse de la conception de la pièce. Pour cela les différents éléments constituant la machine sont pris en compte afin d'en déduire leur consommation en associant à chacun un modèle. Ce modèle sera illustré sur la base du procédé de projection des poudres métalliques, CLAD.

À terme, l'objectif de ce travail est d'intégrer ce modèle dans le processus de conception des pièces en fabrication directe.

## MOTS CLES

Fabrication Additive, Impacts Environnementaux, CLAD, Projection de poudre, Analyse de Cycle de Vie

## 1 INTRODUCTION

Le développement durable prend une place de plus en plus importante dans le monde industriel. C'est pour cela que prendre en compte, lors de la fabrication d'un produit, les aspects environnementaux, en respectant les normes en vigueur, mais aussi en appliquant une démarche de développement durable, permet aux industriels de se différencier afin d'augmenter leur compétitivité.

La recherche concernant l'évaluation environnementale des produits se cristallise sur le développement de l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) [Le Pochat, 2005]. Contrairement à d'autres méthodes d'évaluation des impacts environnementaux (Bilan carbone [ADEME, 2009], Conception pour l'environnement [Vargas Hernandez et al., 2012]), l'ACV permet de quantifier de manière précise et suivant différents critères les impacts d'un système sur l'environnement. L'ACV constitue une approche multicritères, à tous les stades, depuis l'extraction des matières premières à la fin de vie d'un produit et à la gestion des déchets. Cette méthode de quantification a été normée par le SETAC (Société de Toxicologie et Chimie Environnementales) et le PNUE (Programme des Nations Unis pour l'Environnement) sous la norme ISO 14000 [Debusschere, 2009].

Cette normalisation propose un protocole unique d'utilisation en décomposant l'ACV en 4 parties, illustrées par la figure 1 :

- la définition des objectifs, permettant de poser les limites de l'étude et les objectifs à atteindre,
- la réalisation de l'inventaire des émissions et extractions du procédé, cet inventaire doit être le plus exhaustif possible,

- l’analyse de l’impact environnemental, dans laquelle on utilise une classification des impacts suivant différentes catégories. C’est durant cette analyse que l’on utilise des méthodes d’évaluation qui peuvent interpréter différemment les impacts causés sur l’environnement. La plus utilisée actuellement est la méthode Eco-indicateur 99 [PRé Consultants, 2012] mais nous pouvons citer aussi la méthode Impacts 2002+ [Jolliet et al., 2003] développée par une société Suisse ainsi que la méthode CML développée par l’Université de Leiden (Pays-Bas) [University of Leiden, 2012] qui sont fortement utilisées dans le domaine de l’ACV.
- une phase d’interprétation des résultats.

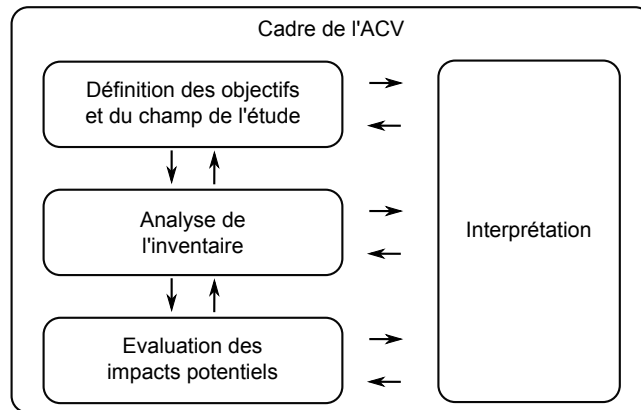


FIGURE 1 – Cadre de l’ACV

De nombreux exemples d’ACV permettant de choisir tel ou tel matériau pour un produit manufacturé en vue de réduire son impact environnemental global existent [Guineheuc Pierre-Marie, 2008, Guillaume and Julien, 2010]. Cependant, très peu de méthodes permettant d’évaluer précisément l’impact d’un procédé de fabrication sur l’environnement existent alors que l’énergie consommée pour mettre en forme un produit peut s’avérer importante. De ce fait il semble important de considérer la phase de mise en forme de façon précise car tous les procédés de fabrication n’ont évidemment pas les mêmes impacts sur l’environnement. Dans cet article, le focus est mis sur les procédés de fabrication additive.

La fabrication additive de pièces métalliques est un procédé qui arrive à maturité permettant d’obtenir des formes complexes que l’on pouvait difficilement fabriquer avant. La prise en compte des aspects environnementaux dans les procédés de fabrication additive est identifiée comme l’un des 8 piliers majeurs du développement de ces procédés dans les 10 ans à venir [Bourell et al., 2009]. Les procédés de fabrication additive sont en effet souvent vus comme des procédés "propres", permettant de déposer la

matière uniquement là où on en a besoin, diminuant ainsi considérablement les déchets par rapport aux procédés de fonderie ou d'enlèvement de matière par exemple. De plus, les possibilités offertes par ces procédés (conception optimisée permettant d'alléger les pièces, fabrication sans outillages ni consommation de lubrifiants, multimatériaux, etc) sont autant d'atouts qu'il convient de quantifier pour faire un bilan global de l' "empreinte carbone" de ces procédés.

Ce bilan global ne peut être fait qu'avec une analyse fine et méthodique du process en prenant en compte toutes les sources de consommation (gaz, matière et électrique).

Cet article propose donc une nouvelle méthodologie qui reprend la structure des ACV afin d'évaluer l'impact environnemental des procédés de fabrication par ajout de matière, et plus particulièrement du dépôt de poudre métallique sur machine CLAD (Construction Laser Additive Directe).

Dans la deuxième partie de l'article, il sera présenté l'ensemble des méthodologies proposées jusqu'à présent pour pouvoir évaluer l'impact environnemental des procédés de fabrication additive. L'un des verrous majeur est que ces méthodes prennent la machine de fabrication comme objet d'étude, mais pour tenir compte des spécificités de la fabrication additive, il convient de considérer le couple pièce-machine. En effet, cela permet de concevoir une pièce en intégrant les contraintes d'une fabrication additive "propre". Lorsque l'on parle d'impacts sur l'environnement, il est nécessaire de prendre en compte l'ensemble des facteurs impactant sur l'environnement c'est-à-dire à la fois la matière première consommée (poudre métallique) mais aussi les gaz utilisés lors de la fabrication et bien évidemment la consommation électrique des unités de mise en forme (source d'énergie pour fusionner la matière, déplacement des axes, refroidisseurs,...).

Ensuite, la méthodologie globale permettant de prendre en compte l'ensemble des sources impactant sur l'environnement sera présentée ainsi que les modèles locaux associés aux différents éléments constituant une machine. Pour finir, une étude comparative entre deux types de trajectoires sera proposée permettant de montrer l'importance de prendre en compte non plus uniquement la machine comme objet d'étude mais l'ensemble pièce-machine.

## 2 ETAT DE L'ART

Un grand nombre d'études existent mais se limitent à évaluer (ou à relever) l'énergie massique nécessaire à un procédé, voire une machine, pour fabriquer une pièce.

Dans le domaine de la fabrication par enlèvement de matière (usinage), des études un peu plus approfondies permettent de déterminer les impacts environnementaux lors de la mise en forme. Munoz et al. [Munoz and Sheng, 1995] proposent une approche analytique pour détermi-

ner ces impacts. De la même manière Dahmus et al. [Dahmus and Gutowski, 2004] proposent une analyse un peu plus globale prenant en compte l'énergie nécessaire pour usiner une pièce mais ils analysent aussi l'impact de la lubrification sur l'environnement ainsi que le lavage des pièces usinées. À ce titre, des études sur l'amélioration des procédés d'usinage du point de vue de l'environnement ont été menés par Pusavec et al. [Pusavec et al., 2010a, Pusavec et al., 2010b] en proposant des usinages avec une lubrification à haute-pression ou criogénèse. Nous pouvons aussi citer Kong et al. [Kong et al., 2011] qui ont étudié l'impact des trajectoires sur la consommation des machines d'usinage. De plus, les études menées par Avram et al. [Avram and Xirouchakis, 2011] permettent de déterminer l'énergie électrique consommée lors de l'usinage d'une pièce. Dans ces travaux, ils mettent en place une méthodologie permettant d'estimer, à partir d'un programme à commandes numériques (CN), l'énergie électrique consommée.

Les premiers travaux traitant de l'impact environnemental des procédés de fabrication additive ont été mené par Luo et al. [Luo et al., 1999] afin de déterminer l'impact des procédés Selective Laser Sintering (SLS) et Fused Deposition Modeling (FDM) en se basant sur l'Eco-Indicateur 95. Ces travaux ont été repris par le "Laboratory of freeform fabrication" qui a publié des résultats similaires à ceux donnés par Luo mais sur des machines plus récentes [Sreenivasan et al., 2010]. Ces travaux ne permettent pas de mettre en place une méthodologie d'optimisation mais ils permettent d'avoir une connaissance globale sur l'impact de ces procédés de fabrication.

Par la suite, des études ont été menées permettant de comparer les procédés conventionnels avec la fabrication additive. Morrow et al. [Morrow et al., 2006] proposent une étude permettant de comparer la fabrication d'un moule par usinage ou par fabrication additive dans laquelle ils mettent en place un indice (rapport Solide/Cavité) permettant de déterminer si la pièce à fabriquer serait plus écologique si elle était faite en usinage ou en fabrication additive. Plus récemment, Serres et al. [Serres et al., 2011] ont publié une étude comparant la fabrication additive par le procédé CLAD (Construction Laser Additive Directe) avec l'usinage sur une pièce donnée. Dans cette étude, ils montrent les avantages de la fabrication additive car cette dernière est moins consommatrice de matière première et ne nécessite pas de fluide de lubrification (toxique pour l'homme). Si ces études montrent les possibilités qu'offrent cette nouvelle technologie et apportent quelques éléments de comparaison, elles restent pauvres en propositions et il convient désormais de proposer une méthodologie d'analyse des impacts complète.

Des méthodologies d'analyses de cycle de vie et développement durable existent par exemple celle développée par Culaba et al. [Culaba and Purvis, 1999] mais elles ne permettent d'évaluer l'impact que globalement sans avoir une connaissance précise du procédé et de l'influence des différents paramètres machines. Une autre méthodologie - CO2PE! ini-

tiative - permettant de réaliser une analyse et une amélioration systématique du procédé à été développée par Kellens et al. [Kellens et al., 2011]. Cette méthodologie est utile pour déterminer de manière globale l'impact environnemental d'un procédé mais elle ne prend en compte que le procédé sans y intégrer le produit et les possibilités d'améliorations du produit pour diminuer l'impact environnemental.

Toutes ces méthodes et études donnent des informations pertinentes sur l'évaluation de l'impact environnemental des machines. La figure 2 permet de récapituler les différentes études menées jusqu'à présent sur la consommation électrique des procédés de fabrication par ajout de matière. En reprenant les travaux menés par Luo et al., on peut dresser un tableau comparatif sur différentes machines. Dans ce tableau de synthèse, on prend en compte uniquement la consommation électrique de la machine en traduisant la consommation électrique en impact environnemental via l'Eco-Indicateur 95.

La valeur du taux de consommation énergétique ECR [kWh/kg] est déterminée à partir du rapport de la puissance électrique moyenne consommée par le procédé,  $P$  [kW], et de la productivité du procédé,  $PP$  [kg/h]. Pour déterminer la productivité, nous prenons en compte le débit de matière projetée  $q_{mat}(cm^3/h)$  ainsi que la masse volumique du matériau fabriqué  $\rho_{mat}(kg/cm^3)$ . La valeur de référence est donc le kilogramme de matière fabriquée. Cette valeur permet de comparer les procédés entre eux.

$$ECR = \frac{P}{PP} = \frac{P[kW]}{q_{mat}[cm^3/h] * \rho_{mat}[kg/cm^3]} \quad (1)$$

On peut donc en déduire que l'impact environnemental (I.E.), en appliquant le facteur de caractérisation ( $f_{electricite}$ ) donné par l'Eco-Indicateur 95, est de :

$$I.E. = f_{electricite} * ECR = 0.57 * ECR \quad (2)$$

Le facteur de caractérisation permet de relier les flux issus de l'inventaire (ici le taux de consommation énergétique) à des impacts environnementaux.

Technologie étudiée	Machines	Matériau	ECR (kWh/kg)	Impact environnemental (mPts/kg)
Stéréolithographie	SLA-250	Résine Epoxy SLA 5170	32.48	18.51
	SLA-3000	Résine Epoxy SLA 5170	41.41	23.60
	SLA-5000	Résine Epoxy SLA 5170	20.70	11.80
Selective Laser Sintering	Sinterstation DTM 2000	Polyamide	40.01	22.81
	Sinterstation DTM 2500	Polyamide	29.77	16.97
	Vanguard HiQ	Polyamide	14.54	8.29
	EOSINT M250 Xtended	Poudre Métallique (Bronze + Ni)	5.41	3.09
	EOSINT P760	Polyamide PA2200 Balance 1.0	36.50	20.81
		Polyamide PA2200 Speed 1.0	39.80	22.69
Polyamide PA3200GF		26.30	14.99	
Fused Deposition Modeling	FDM 1650	ABS	346.43	197.47
	FDM 2000	ABS	115.48	65.82
	FDM 8000	ABS	23.10	13.16
	FDM Quantum	ABS	202.09	115.19
Selective Laser Melting	MTT SLM 250	Poudre Métallique SAE 316L	31.00	17.67
Electron Beam Melting	Arcam A1	Poudre Métallique Ti-6Al-4V	17.00	9.69

FIGURE 2 – Etudes comparatives de l’impact environnemental via l’Eco-Indicateur 95 pour différentes machines déjà étudiées

Ce tableau permet de mettre en avant la difficulté de comparer les machines entre elles uniquement sur des critères de consommations électriques. En effet, ces valeurs seraient à nuancer en fonction des caractéristiques techniques et morphologiques des pièces produites, des paramètres de fabrication réglés sur la machine. Cette nuance n’apparaît pas dans les études précédemment citées. Quelques études récentes commencent à tenir compte de la géométrie de la pièce et des paramètres de fabrication.

Le groupe de recherche de l’Université de Loughborough ” Additive Manufacturing Research Group ” a montré l’influence des paramètres géométriques d’une pièce sur la consommation électrique d’un procédé de fabrication additive. L’équipe de Baumanns [Baumanns et al., 2010, Baumanns et al., 2011] a montré que les rapports section/volume ou périmètre/section avaient une influence sur la consommation globale de la machine. Ce même groupe travaille aujourd’hui sur le projet ATKINS, visant à montrer les avantages (économiques, écologiques) de la fabrication additive [Hague and Tuck, 2007]. Mognol et al. [Mognol et al., 2005], de l’Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes, ont montré que l’orientation de la

pièce dans l'espace machine ainsi que sa conception influent fortement sur la consommation électrique de la machine.

Deux verrous majeurs sont donc identifiés lors de cet état de l'art :

- Il ne suffit pas de quantifier les impacts pour une machine de fabrication, mais il est nécessaire de prendre en compte le couple pièce-procédé dans l'évaluation des impacts environnementaux d'une fabrication
- L'analyse quantitative de ces impacts doit reposer sur une méthodologie globale, basée sur l'ACV, afin de prendre en compte tous les facteurs intervenants (énergie, fluide, matière).

En prenant en compte ces considérations, il est donc intéressant de proposer une méthodologie permettant d'évaluer l'impact environnemental du couple pièce-procédé. En effet, en prenant en compte ce couple, nous pouvons mettre en place une méthode visant à réduire l'impact environnemental d'une pièce en modifiant soit sa conception, soit les paramètres du procédé permettant de la fabriquer (trajectoires, puissance laser, etc).

Une telle méthodologie a donc l'avantage d'évaluer la part de chaque produit (électricité, matière ou fluides) sur l'impact environnemental global de l'ensemble pièce-procédé. À la vue de ces remarques et des possibilités qu'offrent les procédés de fabrication additive, par exemple la fabrication de pièces aux géométries complexes, il semble indéniable qu'une méthodologie permettant d'évaluer l'impact environnemental d'une pièce ou d'un procédé doit prendre en compte à la fois la conception de la pièce mais aussi la technologie de la machine et ses possibilités trajectoires, volume de travail, orientation etc

La Figure 3 permet de montrer la méthodologie proposée par l'équipe MO2P du laboratoire IRCCyN. Cette méthodologie basée sur la conception d'une pièce et de son programme CN, permettant de la fabriquer, propose une première évaluation de l'impact environnement de la pièce suivant trois critères importants de consommation (matière, fluide, électricité). Puis à la suite de cette évaluation, une optimisation permettant la minimisation de cet impact peut être mise en place et une nouvelle conception ou un nouveau programme CN peuvent alors être générés automatiquement en vue de cette réduction.



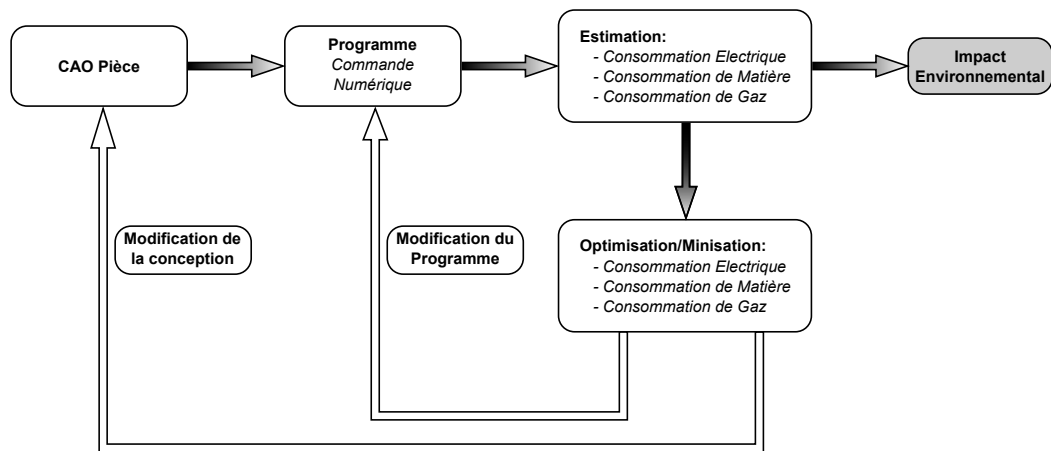


FIGURE 3 – Méthodologie globale d'analyse de l'impact environnemental d'une conception

### 3 ANALYSE GLOBALE

L'ACV est l'outil sur lequel nous nous sommes appuyés pour proposer notre méthodologie. L'avantage de cet outil est donc de pouvoir proposer une analyse globale du procédé ainsi qu'une modélisation locale des facteurs influents sur l'impact environnemental.

Dans un premier temps, il a été nécessaire de définir les limites de notre étude. En effet, sans un cadre limitatif, il serait obligatoire de considérer tout ce qui entre en compte lors de la fabrication d'une pièce, c'est-à-dire la fabrication de la poudre, la production de gaz inerte (argon), la production de fluides hydraulique ainsi que la production d'air comprimé pour ce qui est des produits entrants. Il faudrait également considérer les matériaux et l'énergie utilisés pour la fabrication de la machine. En outre, il aurait fallu prendre en compte le recyclage de la poudre perdue, le recyclage des pièces, le recyclage de la machine en fin de vie.

Dans la méthodologie proposée, nous nous sommes focalisés sur le couple pièce-procédé, de ce fait la fabrication de la poudre ainsi que la fabrication de tous les autres produits ne rentrent pas directement en compte. On considère donc que la matière est déjà sur machine. Cette limitation nous permet dans un premier temps de nous focaliser sur le procédé en lui-même avant d'étendre notre étude. La Figure 4 permet de mettre en avant les limites de l'étude sur ce procédé.

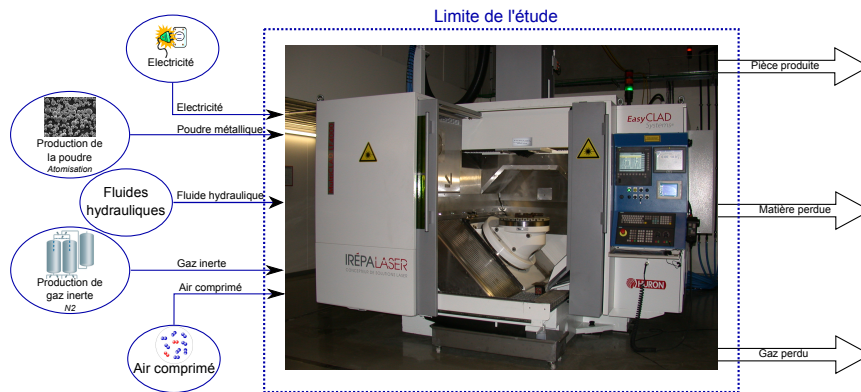


FIGURE 4 – Limites de la méthodologie appliquée au procédé CLAD

L'évaluation de l'impact environnemental d'un procédé lors de la fabrication d'une pièce va donc se décomposer en plusieurs parties. Comme le montre Figure 5, nous avons classé les impacts suivant trois catégories :

- L'impact dû à la consommation électrique,
- L'impact dû à la consommation de matière,
- L'impact dû à la consommation de fluide.

Ces trois impacts permettent de caractériser le couple pièce-procédé mais elles permettent aussi d'en déduire un indice d'Impact Environnemental (I.E.) qui va être ensuite utilisé lors de la pondération des impacts. En effet, comme dans une ACV, une étape de pondération permet de mettre un poids plus important à tel ou tel acteur. Par exemple, si la consommation de matière semble être prépondérante devant les autres, nous pouvons imposer un poids plus fort sur celle-ci. Par défaut, la pondération est équilibrée, c'est-à-dire que l'ensemble des acteurs impliquent le même impact final.

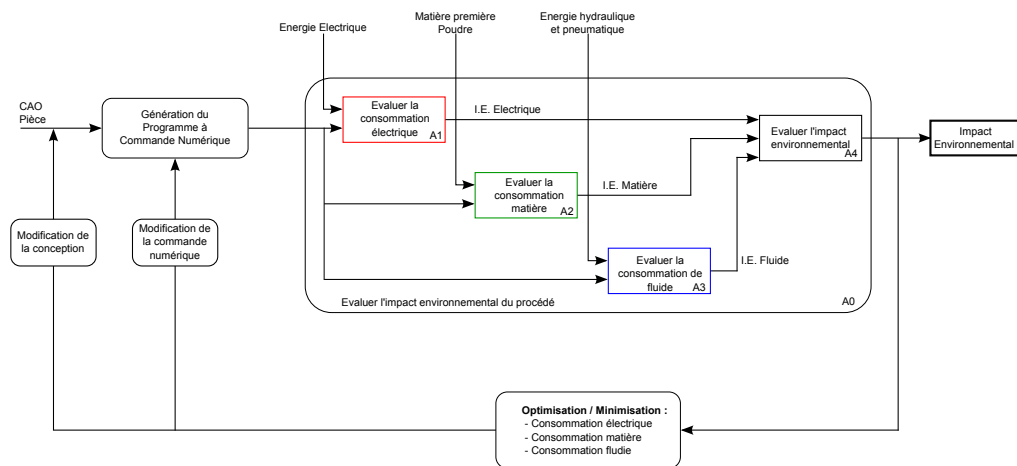


FIGURE 5 – Évaluation de l'impact environnemental du procédé

La méthodologie proposée s'appuie donc dans un premier temps sur la conception de la pièce. À partir de cette conception et des paramètres optimisés de la machine, il est possible de connaître le programme CN qui va permettre de fabriquer la pièce. Dans ce programme, on retrouve un grand nombre d'informations comme les trajectoires, le débit de matière, le débit de gaz ainsi que la puissance laser nécessaires. C'est à partir de ces informations que nous pouvons déterminer l'impact environnemental global de la fabrication. L'avantage d'avoir dissocié ces différents facteurs d'impacts est qu'il sera par la suite possible de minimiser l'impact d'un facteur plutôt qu'un autre ou de mettre en place une optimisation multi-objectifs visant à réduire l'impact global en répondant à une contrainte spécifique (vitesse de fabrication, qualité géométrique, etc).

## 4 VERS UNE ESTIMATION PLUS LOCALE...

L'état de l'art a révélé des verrous scientifiques dans la façon d'évaluer la consommation des différents facteurs d'impact. En effet, la plupart des analyses proposent un ensemble de résultats expérimentaux sans qu'il soit possible de modifier la conception de la pièce ou les paramètres de fabrication en vue d'une amélioration.

En mettant en place des modèles locaux sur l'ensemble des entités qui influencent l'impact environnemental global, il devient facile de localiser le facteur à réduire. Dans un premier temps, pour cet article, nous avons défini des modèles simples pour la consommation de fluides et de poudres. En ce qui concerne la modélisation de la consommation énergétique, des modèles plus approfondis ont été développés et ont été couplés à des mesures expérimentales.

La figure 2 ci-dessous issue de la base de données Ecoinvent liste l'ensemble des facteurs de caractérisation qui seront utilisés par la suite.

Elément	Type	Masse volumique (20°C, 1atm) (kg/m <sup>3</sup> )	Facteur de caractérisation [fc] (mPts/kg)
Fluides de refroidissements	Eau distillée	1 000	0.0026
Gaz conformeur/protecteur	Argon	1.7837	7.2
Gaz porteur	Argon	1.7837	7.2
Poudre métallique	Acier	7 800	86
Electricité	France		12 (mPts/kWh)

FIGURE 6 – Facteurs de caractérisation issus de la base de données Ecoinvent

#### 4.1 Estimation de la consommation de fluides

Comme on peut le voir sur la Figure 4, les fluides à considérer en entrée sont :

- gaz inerte, pour acheminer la poudre métallique depuis son bol de stockage jusqu'au bain de fusion, et créer une enceinte inerte évitant l'oxydation du métal en fusion. Ce gaz permet en outre de former un cône de poudre, la qualité du dépôt réalisé dépend de la géométrie du cône de poudre amené au niveau du faisceau laser. On distingue ainsi le gaz porteur et le gaz conformeur-protecteur (appelé gaz conformeur par la suite).
- fluide hydraulique, pour assurer le refroidissement de l'unité du laser et des axes machines

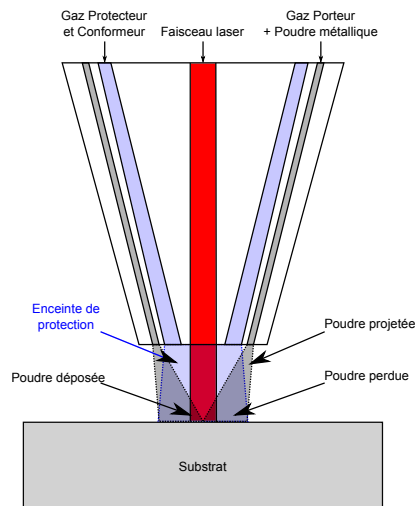


FIGURE 7 – Schématisation de la buse du procédé CLAD

La figure 7, permet de mettre en avant la configuration de la buse utilisée par le procédé CLAD. On peut remarquer la présence de deux arrivées de gaz inerte, l'une permettant d'acheminer la poudre métallique du bol de stockage vers le point de fusion du laser, l'autre arrivée permet de conformer le cône de poudre mais joue aussi le rôle d'enveloppe protectrice. Le gaz inerte est de l'argon. Sa consommation varie lors de la fabrication, elle dépend de la morphologie de la pièce à réaliser, du débit de gaz souhaité ( $d_g$ ) et du temps de réalisation ( $t_{fab}$ ). Il convient donc d'associer un impact environnemental à la consommation d'argon pendant la fabrication, suivant l'équation :

$$I.E.gaz\_inerte = I.E.gaz\ porteur(d_{g1}, t_{fab}) + I.E.gaz\ conformeur(d_{g2}, t_{fab})$$

$$I.E.gaz\_inerte = [d_{g1\ gaz\ porteur} + d_{g2\ gaz\ conformeur}] * t_{fab} * f_{c\ argon} \quad (3)$$

Le fluide assurant le refroidissement est de l'eau distillée, en circuit fermé, donc sa consommation ne varie pas en fonction de la pièce à produire. En outre, le facteur de caractérisation du fluide considéré vaut 0,0026 mpt/kg. Cette valeur très faible, associée au fait qu'il faille considérer l'impact environnemental de ce fluide comme constant nous conduit à négliger les impacts environnementaux liés au fluide de refroidissement. Ainsi, l'estimation des impacts environnementaux liés à la consommation de fluide se résume par la figure 8.

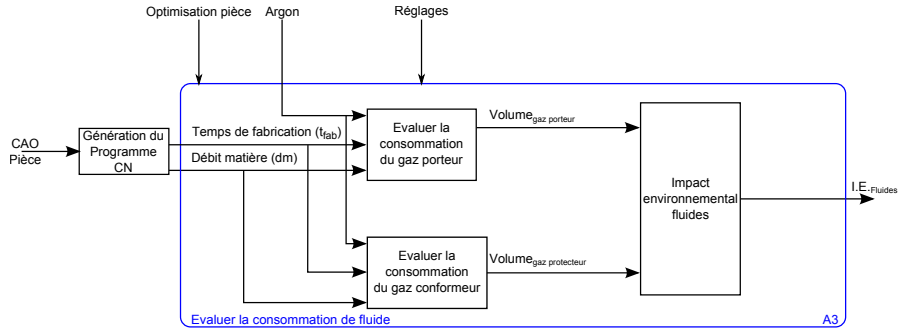


FIGURE 8 – Évaluation de la consommation de fluide

Le modèle mis en place permet donc d'estimer l'impact environnemental lié à la consommation de fluides pendant la fabrication de la pièce directement à partir du programme CN de fabrication, en relevant le débit de gaz souhaité et le temps de fabrication suivant l'équation suivante :

$$I.E.fluides = I.E.gaz\ porteur(d_{g1}, t_{fab}) + I.E.gaz\ conformeur(d_{g2}, t_{fab}) \quad (4)$$

## 4.2 Estimation de la consommation de matière

Dans une seconde partie, l'étude consiste à déterminer la consommation de la poudre lors de la fabrication d'une pièce. En effet, un des avantages de la fabrication additive consiste à projeter et fusionner uniquement la poudre nécessaire. Néanmoins, ceci ne serait vrai que si l'ensemble de la poudre projetée était fondue, ce qui n'est pas la cas. La technologie utilisée possède deux buses permettant de projeter la poudre. Une première buse, appelée MésoCLAD, qui permet d'effectuer des dépôts dont le cordon peut faire jusqu'à 0.6 mm de large avec un débit de dépôt allant de 0.5 à 4 mm<sup>3</sup>/s et une seconde buse, appelée MacroCLAD, permettant d'obtenir des dépôts allant jusqu'à 4.5 mm pour un débit de dépôt allant de 8 à 85 mm<sup>3</sup>/s. Le rendement de chacune de ces buses dépend du débit souhaité. On peut observer sur la figure 7 qu'une partie de la poudre projetée rebondit sur le substrat et n'est donc pas fusionnée. Plus la buse est petite, plus son rendement est faible (dans notre cas environ 35% pour la petite buse et 85% pour la seconde).

De plus, lors de la fabrication il n'est pas conseillé de stopper la projection de poudre car la phase transitoire permettant d'obtenir le débit souhaité est assez longue (environ 35 secondes).

La figure 9 résume la méthode utilisée pour évaluer l'impact environnemental de la matière.

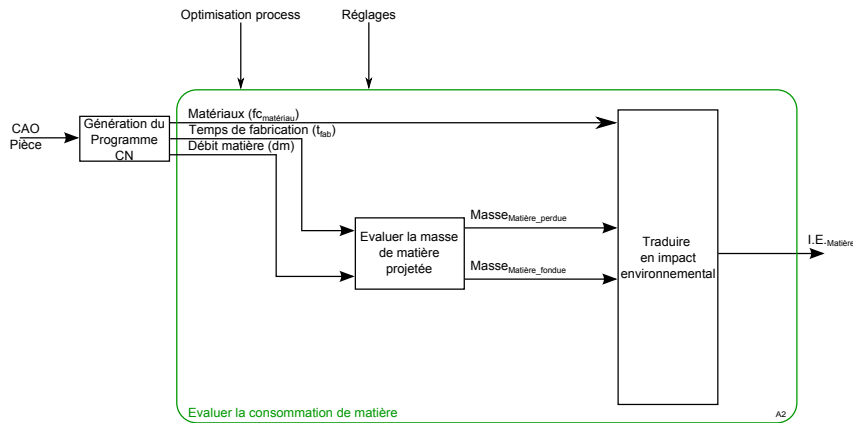


FIGURE 9 – Évaluation de la consommation de matière

Les remarques précédentes ainsi que la figure ci-dessus nous permettent donc de mettre en place l'équation permettant d'estimer l'impact environnemental dû à la consommation de matière en fonction du matériau caractérisé par son facteur de caractérisation ( $fc_{matériau}$ ), du débit de matière ( $d_m$ ), du rendement de la buse ( $r_{buse}$ ), du temps de fabrication ( $t_{fab}$ ) et d'un facteur de pondération ( $k$ ) permettant de pondérer l'impact de la poudre perdue

par rapport à la poudre déposée.

$$I.E.matière = I.E.matperdue(d_m, t_{fab}, r_{buse}) + I.E.matdéposée(d_m, t_{fab}, k, r_{buse})$$

$$I.E.matière = [r_{buse} + k * (1 - r_{buse})] * d_m * t_{fab} * f_{Cmatériau} \quad (5)$$

### 4.3 Estimation de la consommation électrique

L'évaluation de la consommation électrique d'un procédé est une des priorités pour évaluer son impact environnemental. Beaucoup d'études ont déjà été menées autour de cette problématique afin d'estimer l'énergie massive nécessaire à la fabrication pour une machine donnée dans le but de comparer les machines entre elles. Néanmoins, une estimation globale ne permet pas d'envisager une optimisation future. Dans cette partie, nous nous sommes attachés à mettre en place des modèles de consommation électrique sur l'ensemble des unités constituant la machine. La figure 10 permet de référencer l'ensemble des unités susceptibles de consommer de l'énergie électrique lors de la fabrication.

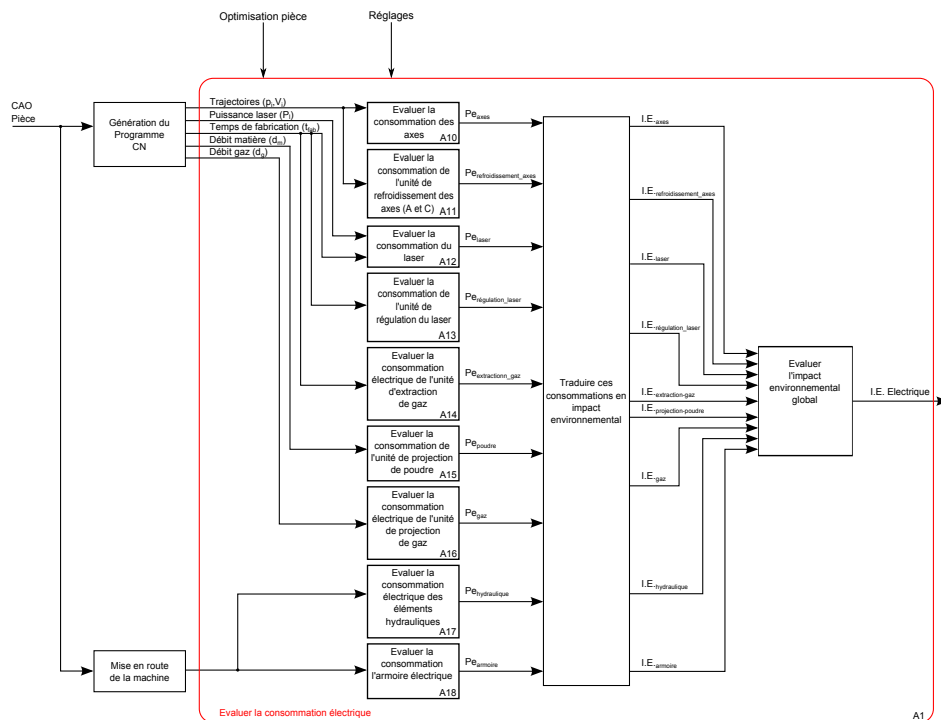


FIGURE 10 – Évaluation de la consommation électrique

Comme le montre la figure ci-dessus, certains éléments de la machine ont une consommation constante au cours de la fabrication c'est le cas par

exemple de l'armoire électrique, de certains composants hydrauliques tandis que d'autres dépendent entièrement du processus et de la stratégie de fabrication choisie (axes machines, laser, refroidisseur, etc). Sur la figure 10 on peut aussi remarquer qu'en sortie du bloc "Génération du Programme CN", plusieurs variables permettent de piloter le processus de fabrication. On retrouve, entre autre, les trajectoires pilotées, la puissance du laser nécessaire, le débit de poudre et de gaz utilisés ainsi que le temps de fabrication. À l'aide de ces différentes variables, nous sommes en mesure de calculer la puissance électrique consommée lors de la fabrication d'une pièce pour chaque unités. À ce jour, nous proposons des modèles d'évaluation de la puissance électrique consommée pour les unités suivantes :

- les axes moteurs, permettant le déplacement de la buse et de la pièce,
- le laser,
- l'unité de refroidissement du laser et de la buse.

Ces modèles nous permettent d'estimer l'impact environnemental dû à la consommation électrique du procédé. L'impact environnemental peut alors être formulé de la façon suivante :

$$I.E.\text{électricité} = I.E.\text{laser}(P_l, t_{fab}) + I.E.\text{régulation\_laser}(P_l, t_{fab}) + I.E.\text{axes}(p_i, V_i) + I.E.\text{constante} \quad (6)$$

Nous allons décrire les modèles utilisés dans les sections suivantes. Ces modèles sont issus soit d'équations électriques et mécaniques qui ont ensuite été validées par des essais expérimentaux, soit d'expérimentations menées grâce à un système d'acquisition de puissance électrique.

#### 4.3.1 Consommation électrique du laser

Le laser utilisé pour le procédé CLAD est de type fibre. Ce laser permet d'obtenir des puissances laser, au niveau du point focal, allant de 100 W jusqu'à 4 000 W. Un tel laser a donc plusieurs avantages. Nous pouvons faire fusionner localement une quantité de poudre importante et ainsi atteindre des débits de projection de poudre allant jusqu'à 85mm<sup>3</sup>/sec. Mais aussi, il est alors possible de travailler avec des matériaux nécessitant un fort apport énergétique afin de les faire fusionner (le titane, par exemple). La commande électrique du laser est divisée en plusieurs modules de puissance qui seront commandés en fonction de la puissance laser désirée. Afin de déterminer la puissance électrique consommée par le bloc laser, nous avons décidé de réaliser des essais en faisant varier la puissance laser. Lorsque nous avons réalisé les essais, nous avons utilisé les deux buses disponibles sur la machine. Néanmoins, la buse MesoCLAD est limitée et ne permet pas de faire transiter une puissance de plus de 400 W sinon l'échauffement de cette dernière est trop important. La figure 11 permet de mettre en avant la variation de puissance électrique consommée par le bloc laser en fonction de la puissance



laser commandée. Sur cette figure, la consigne de puissance laser est tracée en bleue tandis que la consommation électrique du bloc est tracée en rouge.

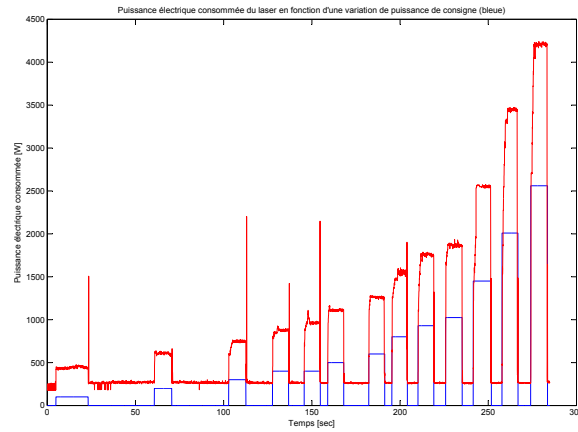


FIGURE 11 – Consommation électrique du laser

A partir de la figure 11, nous pouvons en déduire la courbe de rendement du bloc laser présentée sur la figure 12 qui peut alors être utilisée dans un programme d'estimation de la consommation électrique du laser. En effet, pour toute puissance laser commandée, une projection sur la courbe de rendement nous permet d'estimer la consommation électrique du bloc laser. Nous pouvons remarquer sur la figure 12 que lorsque l'on change la buse mais que l'on impose une même commande (ici 400 W), le rendement du bloc laser chute.

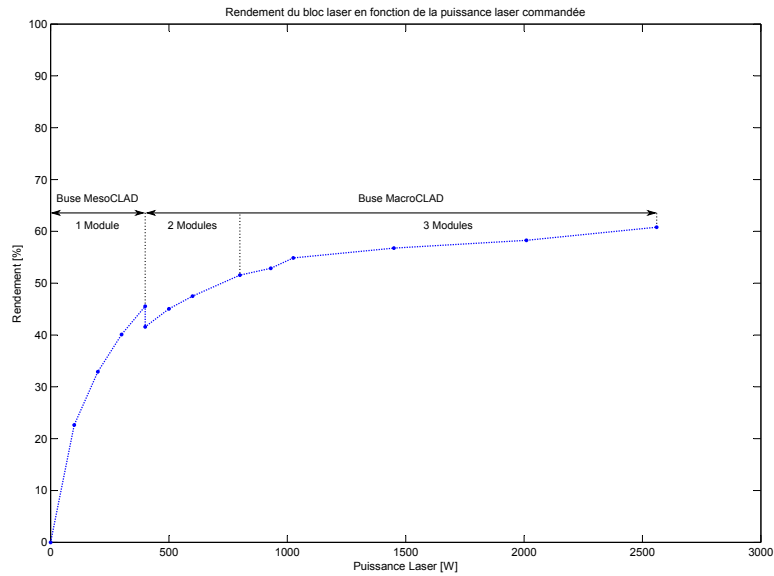


FIGURE 12 – Rendement du bloc laser en fonction de la puissance commandée.

Il est alors possible d'écrire le modèle suivant permettant d'estimer l'impact environnemental dû à la consommation électrique du laser :

$$I.E.laser = g(P_l) * t_{laser} * f_{c\acute{e}lectricit\acute{e}} \quad (7)$$

Où on retrouve :

- $g(P_l)$ , la fonction bijective qui associe à chaque puissance de laser commandée la puissance électrique consommée par l'ensemble,
- $t_{laser}$ , le temps pour lequel le laser est allumé de tel sorte que  $t_{fab} = t_{laser} + t_{\bar{laser}}$ ,
- $f_{c\acute{e}lectricit\acute{e}}$ , le facteur de caractérisation traduisant l'énergie électrique consommée en impact environnemental. Ce facteur de caractérisation est donné par la figure 6 issue de la base de données Ecoinvent.

Après avoir traité la consommation électrique du bloc laser, il est alors judicieux de s'intéresser à l'unité de régulation de la température au sein du bloc laser.

#### 4.3.2 Consommation électrique de l'unité de refroidissement

Comme on a pu le voir précédemment, le procédé CLAD utilise un laser de forte puissance. Lors de la conversion énergétique (énergie électrique en énergie laser), une grande partie de l'énergie est transformée en chaleur. Il devient alors essentiel de disposer d'une unité permettant de refroidir ce laser. En effet, on ne peut pas se contenter d'un refroidissement par convection

avec l'air vu la sensibilité d'un laser fibre, un échauffement trop important de l'unité pourrait alors être source d'endommagement important par la suite. La figure 13 est un relevé de la consommation électrique du refroidisseur utilisé sur notre machine. On peut remarquer deux états de fonctionnement. Le premier état correspond à l'état de veille de l'appareil, dans notre cas il consomme 1520W. Le second état, consommant 3570W, correspond à l'état où l'appareil est en marche et permet donc le refroidissement du laser. Il est donc essentiel de connaître l'état du refroidisseur lors de la fabrication d'une pièce.

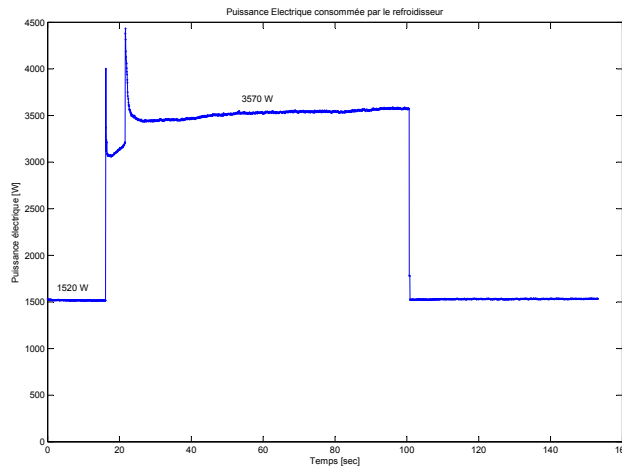


FIGURE 13 – Consommation électrique du refroidisseur

Afin de connaître l'état du refroidisseur, c'est-à-dire le moment où l'unité se met en fonctionnement permettant de faire circuler le fluide de refroidissement, nous avons réalisé une analyse thermodynamique du système. Cette analyse part de l'hypothèse que l'ensemble de l'énergie perdue par effet Joule, lors de la conversion de l'énergie électrique en énergie laser, doit être évacuée par le fluide caloporteur. À partir du débit de ce fluide au sein du circuit fermé ( $d_f$ ), de sa capacité calorifique ( $C_c$ ), de la puissance frigorifique ( $P_f$ ) et de la température au sein du bloc laser ( $T_{laser}$ ) il est possible de déterminer la durée d'allumage de l'unité de régulation suivant l'équation suivante :

$$\boxed{I.E.regulation\_laser = P_{veille\_reg} * t_{fab} * fC_{électricité} + [P_{marche\_reg} - P_{veille\_reg}] * t_{marche} * fC_{électricité}} \quad (8)$$

où  $t_{marche} = f(d_f, C_c, P_f, T_{laser})$ .

Après avoir étudié deux éléments importants vis-à-vis de la consommation électrique de la machine (le laser et l'unité de régulation) nous nous sommes

intéressés à la consommation électrique des axes car c'est sur ces éléments que le choix des trajectoires de fabrication aura une influence du point de vue de la consommation électrique.

### 4.3.3 Consommation électrique des axes

Lors de la fabrication d'une pièce, que ce soit par ajout de matière ou par enlèvement de matière, nous pouvons remarquer que les moteurs électriques sont des éléments constamment sollicités. De plus, selon la stratégie qui sera employée, ces moteurs ne vont pas être utilisés de la même façon. Nous pouvons imaginer qu'une stratégie de fabrication utilisant des trajectoires nécessitant un nombre important d'accélération (de type one-way par exemple) n'aura pas le même impact qu'une stratégie utilisant des trajectoires plus "douces" ou continues. Il s'avère donc important de connaître leur consommation en fonction de la trajectoire définie. La machine étudiée est dotée de 3 moteurs permettant de réaliser des déplacements rectilignes suivant les axes X, Y et Z (respectivement 5.8 kW, 5.8 kW et 4.6 kW) ainsi que de deux moteurs couplés permettant la rotation des axes A et C (respectivement 872 Nm et 554 Nm). L'équation suivante permet de calculer l'impact environnemental d'une trajectoire :

$$I.E_{.axe_i} = E_{e_{axe_i}} * f_{c_{\text{électricité}}}$$

Où  $E_{e_{axe_i}}$  est l'énergie électrique consommée par l'axe i. Cette équation peut alors s'écrire de la manière suivante :

$$I.E_{.axe_i} = \int_0^{t_{fab}} P_{e_{axe_i}}(t) dt * f_{c_{\text{électricité}}} \quad (9)$$

Afin de pouvoir estimer la consommation électrique des axes en fonction d'une trajectoire il est donc essentiel de mettre en place un modèle numérique. Le modèle que nous avons mis en place est illustré sur la figure 14.

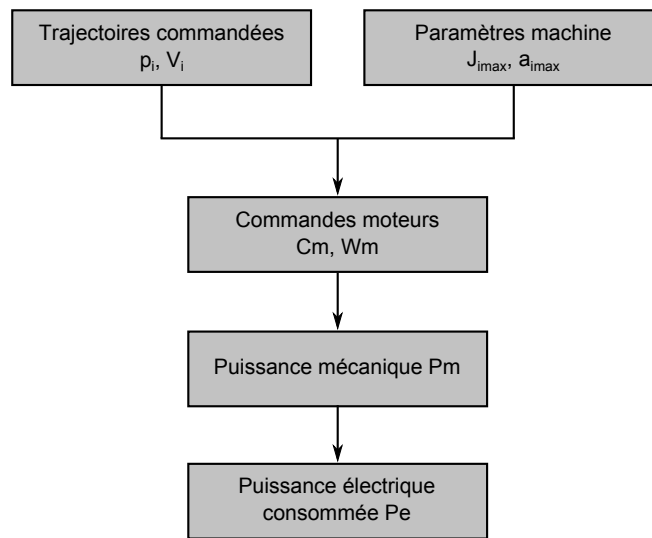


FIGURE 14 – Méthodologie de calcul de la puissance électrique consommée par les axes

En suivant la méthodologie ci-dessus sur l'ensemble des axes et en intégrant sur le temps de fabrication nous pouvons obtenir l'énergie consommée par chaque axe. Une des difficultés dans ce modèle se trouve dans l'estimation de la puissance électrique consommée. Pour ce faire, nous avons réalisé des expérimentations permettant d'obtenir le rendement de chaque moteur en fonction de la puissance mécanique nécessaire. La figure 15 permet de mettre en avant la variation de puissance électrique consommée en fonction de la vitesse programmée.

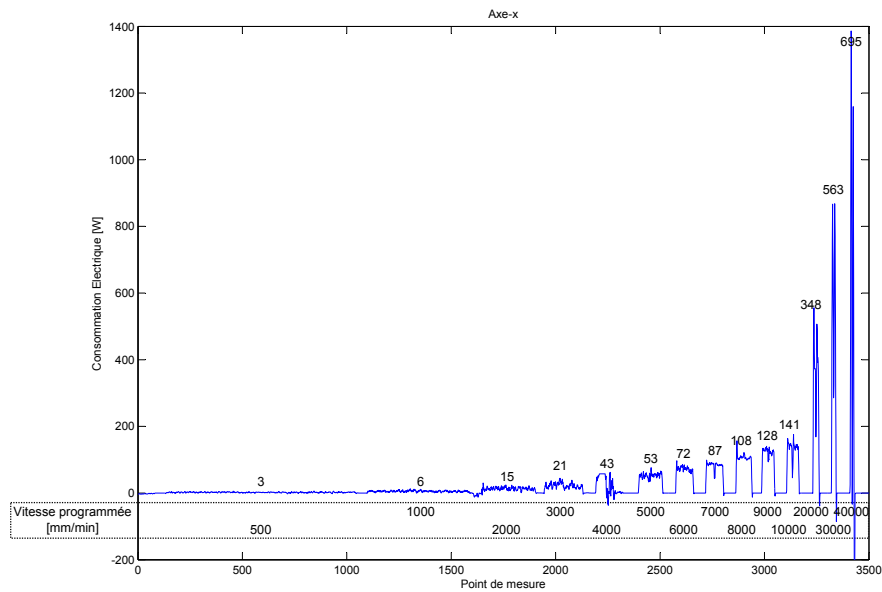


FIGURE 15 – Puissance électrique absorbée de l'axe x en fonction de la vitesse commandée

À partir de cette courbe nous pouvons tracer la courbe de rendement en fonction de la puissance mécanique souhaitée. Pour tracer cette courbe, il faut évaluer la puissance mécanique et plus précisément le couple mécanique utile pour chaque vitesse programmée. Or, lorsque nous atteignons le régime permanent le couple mécanique utile est uniquement proportionnel à la vitesse et à un terme de frottement sec, le terme inertiel étant nul. En réalisant des relevés sur machines, nous en déduisons le couple mécanique utile associée à chaque vitesse commandée. Ce couple sera toujours le même pour une vitesse donnée ce qui nous permet bien de limiter notre courbe de rendement à une courbe et non à une surface de rendement. A partir de ces données, nous pouvons tracer cette courbe sur la figure 16.

Cette courbe nous servira donc à estimer la puissance électrique absorbée par un axe en fonction de la vitesse commandée.

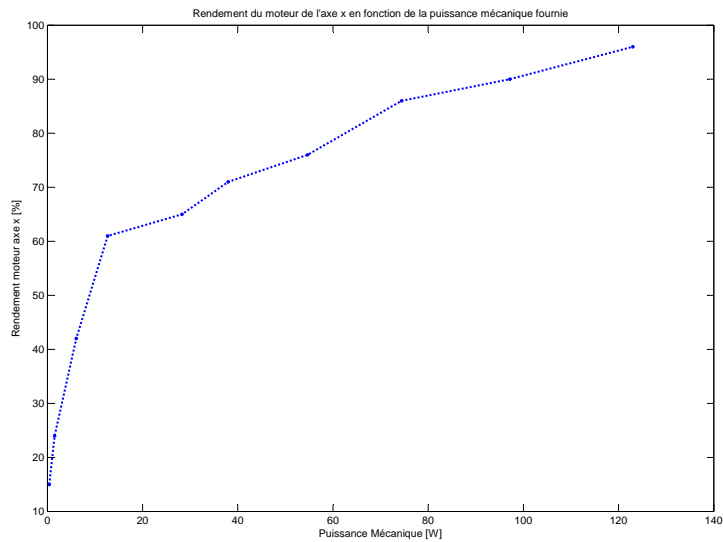


FIGURE 16 – Rendement du moteur de l'axe x en fonction de la puissance mécanique

Nous pouvons ainsi en déduire l'impact environnemental de l'ensemble des axes pour une trajectoire de la manière suivante :

$$I.E.axes = \left( \sum_{i=1}^5 \int_0^{t_{fab}} P_{e_{axe_i}}(t) dt \right) * f_{c_{électricité}} \quad (10)$$

## 5 Exemple d'application : fabrication d'une plaque de 100mm\*12mm

L'exemple suivant va permettre de mettre en application la méthodologie proposée ci-dessus. Dans cet exemple nous allons comparer deux stratégies de fabrication (ZigZag et ZigZig) pour la fabrication d'une plaque de 100mm\*12mm. Ces deux stratégies sont présentées sur la figure 17.

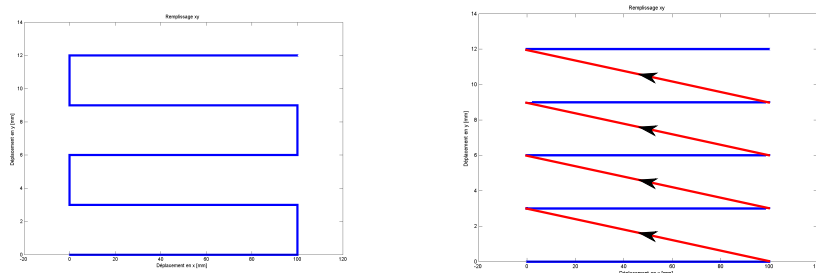


FIGURE 17 – Trajectoires en ZigZag ou en ZigZig

La stratégie appelée "ZigZag" permet d'éviter les fortes accélérations tandis que la stratégie appelée "ZigZig" revient en position initiale, à vitesse rapide, sur l'axe des x avant de relancer un cycle de dépôt. La puissance laser utilisée est de 200 W.

À partir de ces deux stratégies nous allons utiliser la méthodologie pour en déduire l'impact environnemental de chaque gamme de fabrication. Nous allons donc déterminer l'énergie électrique consommée pour la fabrication de la plaque. Nous prenons en compte la consommation des axes, du laser, de l'unité de refroidissement ainsi que la consommation constante. Puis nous déterminerons la quantité de fluides utilisés ainsi que la quantité de matière projetée.

La figure 18 résume l'ensemble des résultats obtenus pour chaque trajectoire.



"ZigZag"	"ZigZig"
$E_{e_{axes}}=6,79.10^{-5}$ kWh	$E_{e_{axes}}=1,59.10^{-4}$ kWh
$E_{e_{laser}}=0,0076$ kWh	$E_{e_{laser}}=0,0075$ kWh
$E_{e_{reg}}=0,0298$ kWh	$E_{e_{reg}}=0,0293$ kWh
$E_{e_{constante}}=0,0026$ kWh	$E_{e_{constante}}=0,0028$ kWh
$V_{fluides}=2,56$ l	$V_{fluides}=2,84$ l
$m_{matiere}=0.0018$ kg	$m_{matiere}=0.0020$ kg
$t_{fab}=31$ s	$t_{fab}=35$ s

FIGURE 18 – Résultat de comparaison des deux stratégies

Avant de calculer l'impact environnemental de chaque stratégie, nous pouvons remarquer que la consommation électrique des axes est plus importante pour la trajectoire de type "ZigZig" étant donné que nous sollicitons plus les moteurs. Néanmoins, cette consommation est compensée par le fait que le laser consomme moins étant donné qu'il est éteint à chaque fois que nous revenons en position initiale. En ce qui concerne la consommation de matière et de fluides, celle-ci est plus importante pour la stratégie "ZigZig". À partir de ces résultats ainsi que des valeurs des facteurs de caractérisation, nous pouvons en déduire l'impact environnemental de chaque stratégie. Ces résultats sont présentés ci-dessous.

"ZigZag"	"ZigZig"
$I.E.electricite = 0.481$ mpts	$I.E.electricite = 0.478$ mpts
$I.E.fluides = 0.033$ mpts	$I.E.fluides = 0.0366$ mpts
$I.E.matiere = 0.155$ mpts	$I.E.matiere = 0.172$ mpts
$I.E.total = 0.669$ mpts	$I.E.total = 0.686$ mpts

FIGURE 19 – Comparaison des Impacts Environnementaux

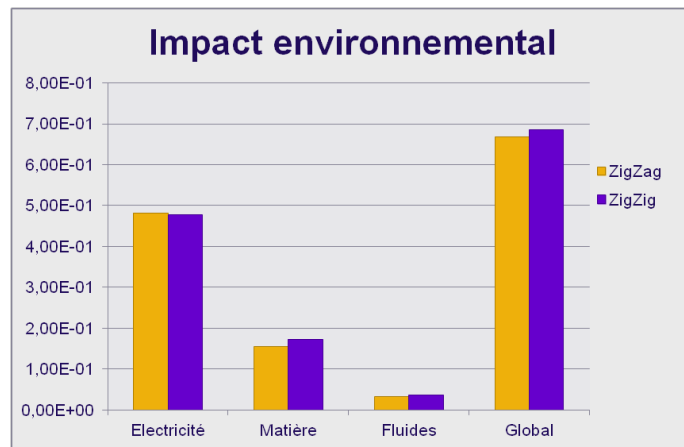


FIGURE 20 – Comparaison des résultats

Ce que nous pouvons remarquer c’est que si l’on se contente d’évaluer l’impact environnemental uniquement du point de vue électrique, la stratégie ”ZigZig” serait plus intéressante car elle permet de minimiser l’utilisation du laser. Étant donné que sa consommation est importante, cette stratégie minimiserait l’impact environnemental. Or, en prenant en compte les fluides et la matière, l’impact environnemental global devient plus important pour cette stratégie.

## CONCLUSION

La méthodologie mise en place par l’équipe MO2P permet d’estimer de façon précise l’impact environnemental d’une conception à partir de son programme CN. Dans cette méthodologie nous ne nous contentons pas d’estimer uniquement l’impact environnemental dû à la consommation électrique mais nous avons voulu prendre en compte, comme pour une ACV, l’ensemble des produits (électricité, matière, fluides) ayant un impact sur l’environnement. De plus, cette méthodologie s’appuyant sur le couple (pièce-procédé), elle permet de prendre en compte les stratégies de fabrication et leurs influences sur l’I.E. global. L’exemple précédent permet de mettre en avant ces aspects. En effet, si l’on se contentait de caractériser l’impact environnemental par la consommation électrique du procédé la stratégie ”ZigZig” serait plus intéressante du point de vue environnemental. Or, en prenant en compte l’ensemble des produits son impact environnemental chute car de la poudre est projetée sans être fusionnée. Cette étude montre l’importance de prendre en compte l’ensemble des facteurs influents sur l’impact environnemental global. Par la suite, il sera intéressant de proposer une méthodologie permettant de générer automatiquement des trajectoires minimisant l’impact environnemental global ou ”local” d’une conception.

## Références

- [ADEME, 2009] ADEME (2009). BILAN CARBONE : Un outil devenu indispensable.
- [Avram and Xirouchakis, 2011] Avram, I. O. and Xirouchakis, P. (2011). Evaluating the use phase energy requirements of a machine tool system. *Journal of Cleaner Production*, 19 :699–711.
- [Baumers et al., 2010] Baumers, M., Tuck, C., Hague, R., Ashcroft, I., and Wildman, R. (2010). A comparative study of metallic additive manufacturing power consumption. In *Solid Freeform Fabrication Symposium*, pages 278–288, Austin, Texas (USA).
- [Baumers et al., 2011] Baumers, M., Tuck, C., Wildman, R., Ashcroft, I., and Hague, R. (2011). Energy inputs to additive manufacturing : Does capacity utilization matter ? In *Solid Freeform Fabrication Symposium*, pages 30–40, Austin, Texas (USA).
- [Bourell et al., 2009] Bourell, D., Leu, M., and Rosen, D. (2009). *Roadmap for additive manufacturing - Identifying the future of freeform processing*. The University of Texas at Austin, Laboratory for Freeform Fabrication, Advanced Manufacturing Center.
- [Culaba and Purvis, 1999] Culaba, A. and Purvis, M. (1999). A methodology for the life cycle and sustainability analysis of manufacturing processes. *Journal of Cleaner Production*, 7 :435–445.
- [Dahmus and Gutowski, 2004] Dahmus, J. and Gutowski, T. (2004). An Environmental Analysis of Machining. In *IMECE2004*, pages 1–10.
- [Debusschere, 2009] Debusschere, V. (2009). *Contributions méthodologiques à l'éco-conception des convertisseurs électromagnétiques d'énergie*. Thèse de doctorat, ENS Cachan.
- [Guillaume and Julien, 2010] Guillaume, J. and Julien, M. (2010). L'évaluation environnementale d'un rasoir. *Technologie*, 167 :90–93.
- [Guineheuc Pierre-Marie, 2008] Guineheuc Pierre-Marie, S.-M. C. (2008). L'évaluation des impacts environnementaux d'un safran. *Technologie*, 157 :28–39.
- [Hague and Tuck, 2007] Hague, R. and Tuck, C. (2007). ATKINS : Manufacturing a Low Carbon Footprint - Zero Emission Enterprise Feasibility Study. Technical report, Loughborough University.
- [Jolliet et al., 2003] Jolliet, O., Margni, M., Charles, R., Humbert, S., Payet, J., and Rebitzer, G. (2003). IMPACT 2002 + : A New Life Cycle Impact Assessment Methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 8(6) :324–330.
- [Kellens et al., 2011] Kellens, K., Dewulf, W., Overcash, M., Hauschild, M. Z., and Duflou, J. R. (2011). Methodology for systematic analysis and

- improvement of manufacturing unit process life-cycle inventory (UPLCI) CO2PE!-initiative (cooperative effort on process emissions in manufacturing). Part 1 : Methodology description. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 17 :69–78.
- [Kong et al., 2011] Kong, D., Choi, S., Yasui, Y., Pavanaskar, S., Dornfeld, D., and Wright, P. (2011). Software-based tool path evaluation for environmental sustainability. *Journal of Manufacturing Systems*, 30 :241–247.
- [Le Pochat, 2005] Le Pochat, S. (2005). *Intégration de l'éco-conception dans les PME : Proposition d'une méthode d'appropriation de savoir faire pour la conception environnementale des produits*. PhD thesis, ENSAM Paris.
- [Luo et al., 1999] Luo, Y., Ji, Z., Leu, M., and Caudill, R. (1999). Environmental performance analysis of solid freeform fabrication processes. In *International Conference on Electronics & the Environment*, pages 1–6, Danvers, MA, USA.
- [Mognol et al., 2005] Mognol, P., Perry, N., and Lopicart, D. (2005). Environment Aspect of Rapid Prototyping : Process Energy Consumption. In *12th CIRP Life Cycle Engineering*, Grenoble (France).
- [Morrow et al., 2006] Morrow, W., Qi, H., Kim, I., Mazumder, J., and Skerlos, S. (2006). Environmental Aspects of Laser-Based and Conventional Tool and Die Manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, 15 :932–943.
- [Munoz and Sheng, 1995] Munoz, A. and Sheng, P. (1995). An analytical approach for determining the environmental impact of machining processes. 53 :736–758.
- [PRé Consultants, 2012] PRé Consultants (2012). Eco-indicator 99 impact assessment method for LCA.
- [Pusavec et al., 2010a] Pusavec, F., Krajnik, P., and Kopac, J. (2010a). Transitioning to sustainable production - Part I : application on machining technologies. *Journal of Cleaner Production*, 18 :174–184.
- [Pusavec et al., 2010b] Pusavec, F., Kramar, D., Krajnik, P., and Kopac, J. (2010b). Transitioning to sustainable production - part II : evaluation of sustainable machining technologies. *Journal of Cleaner Production*, 18 :1211–1221.
- [Serres et al., 2011] Serres, N., Tidu, D., Sankare, S., and Hlawka, F. (2011). Environmental comparison of MESO-CLAD® process and conventional machining implementing life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 19 :1117–1124.
- [Sreenivasan et al., 2010] Sreenivasan, R., Goel, A., and Bourell, D. (2010). Sustainability issues in laser-based additive manufacturing. *Physics Procedia*, 5 :81–90.
- [University of Leiden, 2012] University of Leiden (2012).

[Vargas Hernandez et al., 2012] Vargas Hernandez, N., Okudan Kremer, G., Schmidt, L., and Acosta Herrera, P. (2012). Development of an expert system to aid engineers in the selection of design for environment methods and tools. *Expert Systems with Applications*, 39 :9543–9553.