HAL open science

Evaluation de la performance environnementale des procédés de fabrication

Olivier Kerbrat, Florent Le Bourhis, Rémi Ponche, Pascal Mognol, Jean-Yves Hascoët

To cite this version:

Olivier Kerbrat, Florent Le Bourhis, Rémi Ponche, Pascal Mognol, Jean-Yves Hascoët. Evaluation de la performance environnementale des procédés de fabrication. 21ème Congrès Français de la Mécanique, Aug 2013, Bordeaux, France. pp.1-6. hal-00914003

HAL Id: hal-00914003

https://hal.science/hal-00914003v1

Submitted on 4 Dec 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Evaluation de la performance environnementale des procédés de fabrication

O. KERBRAT, F. LE BOURHIS, R. PONCHE, P. MOGNOL, J.-Y. HASCOËT

Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes (IRCCyN), UMR CNRS 6597, 1 rue de la Noë, BP 92101, 44321 NANTES Cedex 3

Mots clefs : impact environnemental, procédés innovants, fabrication additive, modèle prédictif

1. Procédés de fabrication et éco-conception

1.1. Définition et principe de l'éco-conception

Selon la norme ISO 14050, l'éco-conception est « l'intégration des aspects environnementaux dans l'ensemble du processus qui transforme des exigences en caractéristiques spécifiques ou en spécifications d'un produit, d'un processus ou d'un système » [1]. On parle également de « conception pour l'environnement » ou « partie environnementale de la gestion responsable des produits ». Son objectif est de diminuer, sur l'ensemble du cycle de vie du produit, l'impact environnemental global de ce produit.

Comme le montre la FIG. 1, l'ensemble du cycle de vie d'un produit est généralement segmenté en quatre étapes distinctes : extraction des matières premières, mise en forme des différents composants, usage du produit et fin de vie.

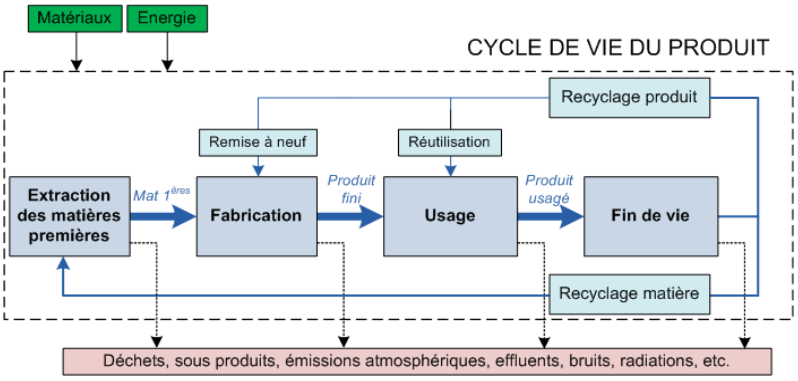

FIG. 1 - Etapes du cycle de vie d'un produit.

Entre les différentes phases, il y a des étapes de transport qu'il convient également d'intégrer lors de l'évaluation environnementale du produit : transport des matières premières, approvisionnement par les fournisseurs, expéditions vers les clients, collectes des produits en fin de vie.

Les entrants peuvent généralement être classés en deux grandes catégories : les matériaux et l'énergie. Les entrants de matériaux sont associés à divers aspects environnementaux, tels que l'utilisation des ressources, l'exposition des personnes et des écosystèmes aux contaminants, etc. Les entrants d'énergie sont nécessaires à la plupart des étapes du cycle de vie du produit. Chaque type de source d'énergie (nucléaire, hydroélectrique, géothermique, solaire, éolienne, …) comporte des aspects environnementaux identifiables.

Les sortants générés au cours du cycle de vie du produit concernent : les déchets, qui peuvent être générés à chaque étape du cycle de vie, les sous-produits et co-produits, les émissions atmosphériques (rejets de gaz,

vapeurs et particules dans l'air), les effluents (libération de substances dans les eaux superficielles ou la nappe phréatique), le bruit, les radiations, les champs électromagnétiques, etc. [2]

L'évaluation environnementale des produits consiste, d'une part, à quantifier les impacts environnementaux du cycle de vie du produit étudié, et d'autre part, à identifier et évaluer dans quelle mesure les différents paramètres, caractéristiques et fonctionnalités du cycle de vie du produit sont à l'origine des impacts environnementaux mesurés [3]. L'évaluation environnementale requiert les connaissances suffisantes des sciences de l'environnement (fondamentales, naturelles et sociales), les connaissances métiers inhérentes au produit étudié et à sa mise en œuvre ainsi que les connaissances des sources de données permettant d'alimenter le processus d'évaluation environnemental. C'est donc une étape complexe de l'éco-conception, et les outils d'évaluation environnementale doivent être développés par les experts des domaines considérés. Or le concepteur de produits mécaniques ne peut généralement pas se targuer d'être expert dans les procédés d'extraction de matières premières, de fabrication ou de la fin de vie des produits. De là nait la nécessité de proposer des outils simplifiés d'évaluation environnementale pour les différentes phases de vie, utilisables en phase de conception.

Ainsi, généralement, l'analyse de l'impact environnemental, dans laquelle on utilise une classification des impacts suivant différentes catégories se base sur des méthodes d'évaluation qui peuvent interpréter différemment les impacts causés sur l'environnement. La plus utilisée actuellement est la méthode Eco-indicateur 99 [4], qui traduit les impacts en *points*, nombres adimensionnels utiles pour des comparaisons. La valeur de 1 *point* correspond à un millième de l'impact environnemental moyen d'un européen sur une année. On parle donc souvent en *millipoints* (mpts). À titre comparatif, la production d'un kg d'acier « de base » correspond à environ 100 mpts, la production d'un kg d'acier inoxydable à environ 900 mpts.

1.2. La place de la fabrication dans les outils d'éco-conception

Pour faciliter l'accès à l'éco-conception, certains éditeurs de CAO ont intégré à leurs logiciels des outils simplifiés d'analyse de cycle de vie. C'est le cas du module Sustainability de SolidWorks par exemple. Si ces outils sont appréciés pour faire des comparaisons de conceptions sans forcément maîtriser toutes les étapes d'une analyse de cycle de vie complète, ils ne sont en revanche pas adaptés à la caractérisation précise des étapes de fabrication. Ils ne conviennent pas non plus pour témoigner des démarches de progrès inhérentes à la prise en compte du volet environnemental dans l'industrie manufacturière.

Il convient alors de développer des outils d'évaluation des impacts environnementaux suffisamment performants pour tenir compte des liens entre les entrants (matériaux et énergie), les sortants (déchets et autres) en caractérisant les impacts environnementaux liés à la phase de fabrication. Ceci permettra au concepteur de maitriser l'éco-performance de son produit dès la phase de conception. La FIG. 2 résume les attentes en focalisant sur la phase de fabrication.

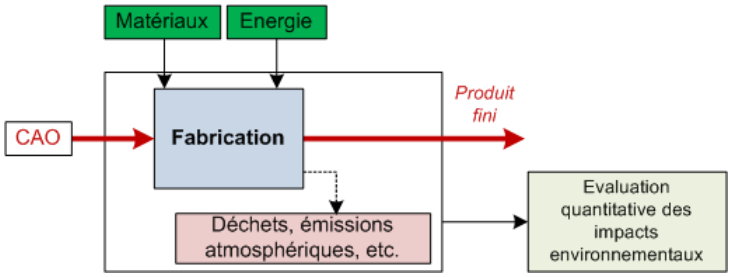

FIG. 2 - Evaluation environnementale liée à la phase de fabrication.

2. Le développement durable comme facteur de compétitivité

Pendant des années, la maitrise des impacts environnementaux a été vue comme déconnectée des réalités pratiques et n'a donc pas trouvé sa place dans l'industrie manufacturière. Les choix faits lors de la phase de définition du procédé de fabrication (choix de procédé, de machines, stratégies de fabrication, trajectoires,

paramètres de fabrication) sont cependant très liés à l'aspect économique. Désormais, les normes (ISO 140XX) et directives européennes (REACH, DEEE, RoHs) engagent les entreprises à respecter un certain nombre de critères environnementaux et laissent entrevoir des perspectives de compétitivité intéressantes. Les bénéfices potentiels peuvent inclure :

- L'abaissement des coûts par l'optimisation de l'utilisation des matières et énergies, par l'adoption de procédés plus efficaces et par la réduction des déchets à éliminer ;
- La stimulation de l'innovation et de la créativité ;
- L'identification de nouveaux produits tels que ceux fabriqués à partir de matériaux mis au rebut ;
- La possibilité de répondre aux attentes des clients ou de les surpasser ;
- L'amélioration de l'image de l'entreprise ;
- De meilleures opportunités d'attirer le financement et les investissements, en particulier de la part d'investisseurs soucieux de l'environnement ;
- Une meilleure motivation des employés ;
- La réduction des risques.

Ainsi l'évaluation quantitative des impacts environnementaux de la fabrication d'une pièce a le double avantage de :

- Proposer des données précises pour l'approche cycle de vie complète du produit dans une démarche d'éco-conception ;
- Fournir un atout concurrentiel indéniable, sur le plan économique et environnemental.

Même si l'impact de la phase de fabrication n'est pas toujours majoritaire sur le cycle de vie complet d'un produit, dès lors que des choix sont à faire (choix de machines, de stratégies, de paramètres, …) la prise en compte du volet environnemental dans les choix pourra être un atout significatif pour les perspectives de compétitivité.

3. Application à la fabrication additive

3.1. Un procédé adapté à l'éco-conception ?

La fabrication additive est un procédé qui arrive désormais à maturité. Elle permet d'obtenir des géométries que l'on peut difficilement fabriquer autrement (formes complexes, formes intérieures creuses non débouchantes, angles droits intérieurs, etc.) et dans une gamme de matériaux élargie (ABS colorés, alliages chrome-cobalt, inconel, titane, multimatériaux, …). La prise en compte des aspects environnementaux dans les procédés de fabrication additive est identifiée comme l'un des huit piliers majeurs du développement de ces procédés dans les dix ans à venir [5]. En parallèle, la fabrication additive métallique a été identifiée comme l'une des quatre technologies clés pour les experts internationaux du consortium IMS 2020, qui présentent une vision des sujets de recherche à développer dans les deux années à venir pour aboutir à une fabrication durable et des procédés à consommation énergétique maitrisée en 2020 [6]. La fabrication additive et le développement durable sont également cités dans l'agenda stratégique de la plateforme européenne Manufuture [7].

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 telles que la conception optimisée permettant d'alléger les pièces ou la fabrication sans outillage ni consommation de lubrifiant par exemple, sont autant d'atouts qu'il convient de quantifier pour faire un bilan global de la performance environnementale de ces procédés.

3.2. Fabrication additive et environnement : état de l'art

En fabrication additive, les pièces sont obtenues par ajout successif de matière. Dans chaque couche, la matière est agglomérée grâce au déplacement de la source d'énergie ou de la tête de dépôt (dépendant de la

technologie) suivant une trajectoire de fabrication programmée. La géométrie finale des pièces résulte directement de la trajectoire choisie [8]. L'impact des stratégies de trajectoires sur les caractéristiques géométriques des pièces s'explique également par leurs fortes influences sur les phénomènes multiphysiques mis en jeu au cours de la fabrication [9, 10].

Les premiers travaux traitant de l'impact environnemental des procédés de fabrication additive ont été menés à la fin des années 1990 [11]. Il s'agissait de déterminer l'impact de machines de fusion sélective et de dépôt de fil en se basant sur l'Eco-Indicateur 95 pour l'évaluation environnementale (antérieur à l'Eco-Indicateur 99). Par la suite, des études ont été menées permettant de comparer les procédés conventionnels avec la fabrication additive. Morrow et al. [12] proposent une étude permettant de comparer la fabrication d'un moule par usinage ou par fabrication additive. Serres et al. [13] ont publié une étude comparant la fabrication additive par le procédé CLAD (Construction Laser Additive Directe) avec l'usinage sur une pièce en Ti_6Al_4V. 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). Une autre méthodologie - CO2PE! initiative - permettant de réaliser une analyse et une amélioration systématique des procédés, incluant quelques technologies relatives à la fabrication additive est actuellement en cours de développement [14]. Si ces études montrent les possibilités qu'offrent cette nouvelle technologie et apportent quelques éléments de comparaison, elles ne tiennent pas compte des possibilités de choix de stratégie de fabrication ou de réglages de paramètres, ce qui peut pourtant engendrer un impact minimisé (consommations énergétique et matière moindres). D'autres études s'intéressent plus spécifiquement à la consommation électrique des procédés de fabrication additive et proposent des voies d'amélioration [15,16], mais ne tiennent pas compte tous les facteurs intervenant (matière et énergie).

En prenant en compte ces considérations, il devient intéressant de proposer une méthodologie permettant d'évaluer l'impact environnemental du couple pièce-procédé, à partir des stratégies de trajectoires, en prenant l'ensemble des éléments entrants et sortants pour caractériser l'impact environnemental de la phase de fabrication et proposer des voies d'amélioration, soit sur la conception, soit sur les paramètres de fabrication. La méthodologie globale est présentée sur la FIG. 3.

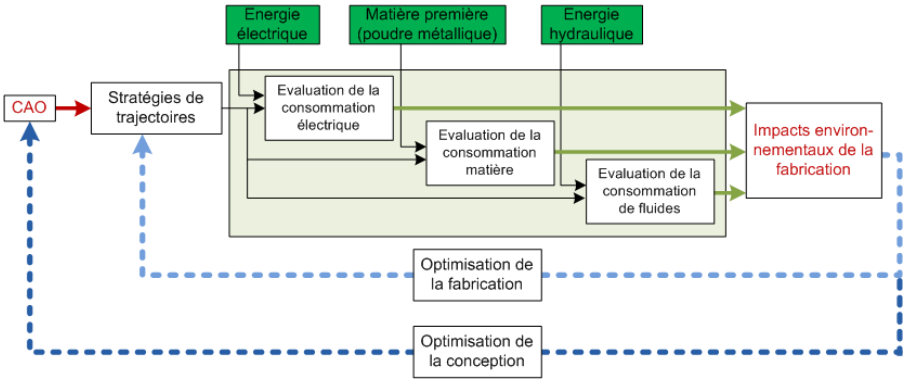

FIG. 3 - Méthodologie de détermination des impacts environnementaux.

3.3. Exemple de choix de trajectoires à partir de considérations environnementales

La méthodologie présentée sur la FIG. 3 a été développée pour la projection de poudre métallique, en déterminant les modèles fins d'évaluation quantitative des consommations électrique, de matière et de fluides à partir des stratégies de trajectoires [17]. À partir de relevés expérimentaux de puissance électrique, un modèle a été créé permettant de déterminer les impacts environnementaux liés à la consommation d'énergie électrique des différents systèmes de la machine de projection de poudre (axes de déplacement, laser, arrivée de la poudre, veille). Le modèle est complété par les impacts liés à la consommation de poudre et à l'utilisation de fluides (gaz de protection, refroidissement) pendant la fabrication. Les impacts

environnementaux sont déterminés à partir des facteurs de caractérisation donnés par l'Eco-Indicateur 99 qui permet de relier les flux de consommation à des impacts sur l'environnement. Cela permet donc de comparer des stratégies de trajectoires à partir de considérations environnementales. La FIG. 4 présente le modèle CAO illustrant la méthodologie, la FIG. 5 présente les deux stratégies pour la réalisation d'une couche. Les accélérations et décélérations des axes sont bien plus importantes dans la stratégie ZigZig, ce qui fait que la consommation électrique est 2,9 fois plus élevée. Cependant, cela est à nuancer par la consommation électrique plus faible du laser, car éteint pendant la phase de retour à vitesse rapide (pointillés rouge sur la FIG. 5). En outre, cette stratégie ZigZig est plus lente (12,5 %) et consomme 11,5 % plus de matière. Ainsi pour comparer efficacement les deux stratégies, il est nécessaire de faire le bilan complet, matière et énergies, en traduisant les consommations en impacts environnementaux. Les résultats sont présentés dans le TAB. 1et la FIG. 6.

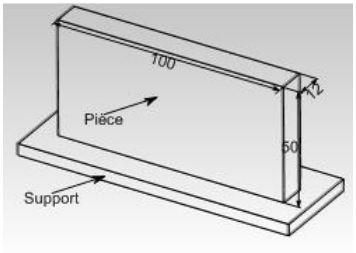

FIG. 4 - CAO de la pièce exemple (unités : mm).

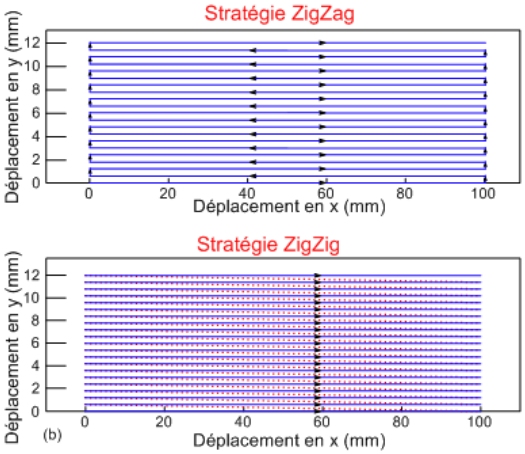

FIG. 5 - Les deux stratégies utilisées.

	"ZigZag"	"ZigZig"	Ecart	Traduction en mpts
Ee_{axes} (kWh)	0.0506	0.1464	+189 %	12 mpts/kWh
Ee_{laser} (kWh)	6.3	6.24	-1 %	12 mpts/kWh
Ee_{froid} (kWh)	24.9	24.66	-1 %	12 mpts/kWh
Ee_{cst} (kWh)	2.16	2.46	+14 %	12 mpts/kWh
V_{fluide} (l)	2134.1	2436.3	+14 %	7.2 mpts/kg
$m_{matière}$ (kg)	1.38	1.56	+13 %	86 mpts/kg
t_{fab} (min)	427	487	+14 %	

TAB. 1 – Détails des résultats

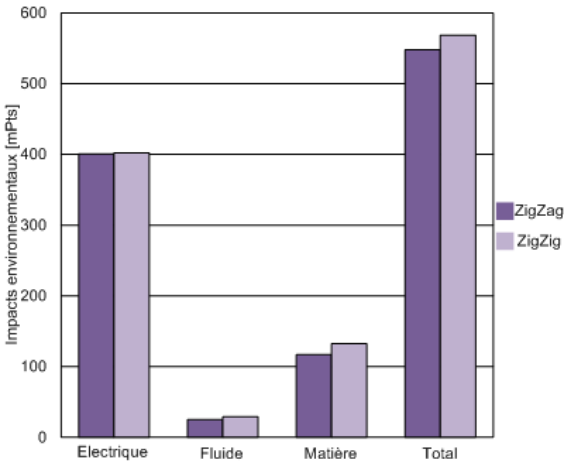

FIG. 6 – Comparaison des impacts.

Au final, on constate que si on tient compte uniquement de la consommation électrique, les deux stratégies ont le même impact. En revanche, si on prend compte également les consommations de matière et de fluides, la stratégie ZigZag est meilleure, de 20 mPts. Cet exemple permet d'illustrer l'utilisation des modèles d'évaluation quantitative des impacts environnementaux de la phase de fabrication, et met en avant l'importance de prendre en compte l'ensemble des éléments entrants et sortants pour une méthodologie. En effet, il ne s'agit pas de diminuer les impacts sur un élément de la fabrication (la consommation électrique du laser par exemple) pour les augmenter sur un autre élément (consommation d'argon). Le modèle prédictif ainsi développé permet la vision globale et évite ainsi les transferts d'impacts entre éléments.

4. Conclusion et perspectives

Dans cet article, l'intégration du volet environnemental dans les choix liés à la fabrication a été abordée. S'il est intéressant de considérer cet aspect comme facteur de compétitivité pour les entreprises manufacturières, il est nécessaire de l'intégrer dans une démarche globale, prenant en compte tous les impacts environnementaux et pas uniquement la consommation électrique. De plus, il convient de définir des modèles fins d'évaluations quantitatives des impacts qui puissent être intégrés dans l'approche cycle de vie complète.

Pour être utilisée dans une démarche d'optimisation de la conception et de la fabrication des produits, la méthodologie d'évaluation des impacts liés à la phase de fabrication présentée est associée à une méthode plus complète de Design for Manufacturing. Il peut donc y avoir un couplage entre les choix faits en conception pour améliorer la fabricabilité du produit et la prise en compte de la performance environnementale du procédé de fabrication (Design for Green Manufacturing).

References

[1] ISO 14050:2009 : Management environnemental – Vocabulaire, 2009.
[2] XP ISO/TR 14062 : Management environnemental – Intégration des aspects environnementaux dans la conception et le développement de produit, 2003.
[3] Le Pochat S., Intégration de l'éco-conception dans les PME : Proposition d'une méthode d'appropriation de savoir-faire pour la conception environnementale des produits, Thèse de Doctorat, ENSAM Paris, 2005.
[4] PréConsultants, Eco-indicator 99 impact assessment method for LCA, 2012.
[5] Bourell D., Leu M., Rosen D., Roadmap for additive manufacturing – Identifying the future of freeform processing, The University of Texas at Austin, Laboratory for Freeform Fabrication, 2009.
[6] IMS2020, Roadmap on sustainable manufacturing, energy efficient manufacturing and key technologies,
[7] Manufuture, Strategic Research Agenda, Report of the high-level group, 2006.
[8] Ponche R., Kerbrat O., Mognol P., Hascoët JY., Consideration of the manufacturing trajectories in a global design for additive manufacturing technology, ASME 11th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis, 3, 745-754, 2012.
[9] Aziz MSA., Furumoto T., Ueda T., Abe S., Hosokawa A., Tanaka R., Study on thermal and strain behavior in selective laser sintering process, Key Engineering Materials, 516, 203-208, 2012.
[10] Bo Q., Yu-Sheng S., Qing-song W., Hai-Bo W., The helix scan strategy applied to the selective laser melting, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 63(5-8), 631-640, 2012.
[11] Luo Y., Leu M., Ji Z., Assessment of environmental performance of rapid prototyping and rapid tooling processes, Proceedings of Solid Freeform Fabrication Symposium, 783-792,1999.
[12] Morrow W., Qi H, Kim I., Mazumder J., Skerlos SJ., Environmental aspects of laser-based and conventional tool and die manufacturing, Journal of Cleaner Production, 15(10), 932-943, 2007.
[13] Serres N., Tidu D., Sankare S., Hlawka F., Environmental comparison of MESO-CLAD® process and conventional machining implementing life cycle assessment, Journal of Cleaner Production, 19(9-10), 1117-1124, 2011.
[14] Kellens K., Dewulf W., Overcash M., Hauschild M., Duflou J., Methodology for systematic analysis and improvement of manufacturing unit process life-cycle inventory, The International Journal of Life-Cycle Assessment, 17(1), 69-78, 2012.
[15] Mognol P., Lepicart D., Perry N., Rapid prototyping: energy and environment in the spotlight, Rapid prototyping journal, 12(1), 26-34, 2006.
[16] Baumers M., Tuck C., Wildman R., Ashcroft I, Hague R., Energy inputs to additive manufacturing: Does capacity utilization matter?, Proceedings of Solid Freeform Fabrication Symposium, 30-40, 2011.
[17] Mognol P., Hascoët JY., Le Bourhis F., Kerbrat O., Environnemental impacts assessement in additive manufacturing, 17th European Forum on Rapid Prototyping, 2012.