HAL
open science

Vers une estimation de l'énergie de fabrication d'un produit dès sa conception

Jérémy Bonvoisin, Sebastian Thiede

To cite this version:

Jérémy Bonvoisin, Sebastian Thiede. Vers une estimation de l'énergie de fabrication d'un produit dès sa conception. 13ème Colloque National AIP-PRIMECA - Démarche et innovation dans la conception et la production des systèmes intégrés, Mar 2012, Le Mont-Dore, France. hal-00688879

HAL Id: hal-00688879

https://hal.science/hal-00688879

Submitted on 19 Apr 2012

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.

VERS UNE ESTIMATION DE L'ÉNERGIE DE FABRICATION D'UN PRODUIT DÈS SA CONCEPTION

Jérémy Bonvoisin (1), Sebastian Thiede (2)
(1) Université de Grenoble, Laboratoire G-SCOP, 46 av. Félix Viallet, 38031 Grenoble Cedex 1, 04 56 52 98 10, jeremy.bonvoisin@g-scop.inpg.fr
(2) Sebastian Thiede, Technische Universität Braunschweig, Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik, Langer kamp, 19b, D-38106 Braunschweig, Germany.

Résumé:

L'efficacité énergétique est une préoccupation croissante dans l'industrie. De nombreuses initiatives ont déjà été menées et sont en cours afin de diminuer la consommation des systèmes de production. De même, une part croissante des industriels s'intéresse à l'éco-conception. Cependant, l'influence des produits sur la consommation des systèmes de production, ainsi que celle du système de production sur l'impact environnemental d'un produit, ne sont que rarement prises en compte. Ceci est le résultat d'un manque de connaissance quant aux liens existants entre le produit et les impacts environnementaux qu'il fait générer au système de production. En se focalisant sur la seule consommation énergétique, cet article contribue à clarifier le lien existant entre conception de produit et impact environnemental de la production. En synthétisant la littérature existante, qui offre un ensemble de solutions partielles intéressantes, l'article propose un cadre unifié permettant d'estimer l'énergie de fabrication d'un produit. Le développement ainsi rendu possible d'outils d'aide à la conception et à la planification de la production permettrait de mettre en œuvre des démarches intégrées et cohérentes de réduction des consommations.

Mots clés: éco-conception, green manufacturing, énergie de fabrication.

1 Introduction

L'efficacité énergétique est l'une des préoccupations les plus débattues de la fin du siècle dernier et du début de celui-ci. L'importance qu'elle a acquise jusqu'aujourd'hui est la résultante de plusieurs problématiques sociétales de grande ampleur : changement climatique, dépendance énergétique, rareté des ressources, hausse des prix de l'énergie, etc. Problématique transversale, la recherche d'efficacité énergétique touche de nombreux niveaux d'organisation de la société, des politiques publiques aux choix de consommation individuels. Pour les entreprises, cette recherche est également l'occasion de gagner en productivité, notamment pour celles dont l'énergie représente une part non négligeable des coûts.

L'industrie est l'un des contributeurs les plus significatifs à la consommation énergétique des économies européennes [1], et de nombreuses démarches ont déjà été réalisées pour optimiser l'utilisation d'énergie dans ce secteur [2]. L'énergie en est un enjeu majeur – écologique d'une part, mais également économique, la consommation énergétique pouvant représenter une part significative des coûts de production [3]. En requérant l'utilisation de procédés spécifiques et en contraignant leur configuration, les caractéristiques recherchées des produits ont une influence importante sur les consommations mises en jeu en production. Cependant, cet axe d'amélioration n'a pas été exploré jusque là.

D'un autre côté, les démarches d'éco-conception, visant à diminuer l'impact environnemental des produits sur l'ensemble de leur cycle de vie, négligent généralement la phase de fabrication. Les données disponibles en conception ne sont en effet pas suffisantes pour faire le lien entre les caractéristiques d'un produit et la consommation liée à sa fabrication [4]. Les données disponibles aujourd'hui dans les bases de données environnementales utilisées dans les Analyses de Cycle de Vie (ACV) [5] sont souvent des moyennes régionales et ne reflètent pas la réalité [6]. De plus, ces données sont paramétrées par le poids du produit, qui n'est pas un critère représentatif de l'influence du produit sur la consommation énergétique de sa fabrication [7].

Disposer d'informations quant au lien existant entre les caractéristiques d'un produit et son énergie de fabrication permettrait donc de contribuer autant à des démarches d'éco-conception qu'à des démarches de réduction des impacts des sites de production. Dans cet article, nous examinons l'état de la recherche sur ce sujet et présentons un cadre théorique permettant de prévoir la consommation énergétique d'un produit dès sa conception. Dans une première partie, nous présentons les différentes sources de la consommation énergétique des systèmes de production. Dans une seconde partie, nous présentons les paramètres influant sur ces consommations, l'état de l'art des modèles pour les représenter, ainsi que les méthodes pour les prendre en compte dans les calculs de consommation. Enfin, nous proposons dans une troisième partie un cadre unifié permettant de rendre compte de l'ensemble des consommations liées à la fabrication d'un produit, avant de conclure sur les apports de cet article.

2 Sources de consommation

La fabrication d'un produit met en jeu un ensemble de consommations qu'il nous faut distinguer. Tout d'abord, un produit est issu de la transformation d'une matière première par un procédé, mis en œuvre par une machine-outil consommant directement de l'énergie. Certaines recherches semblent indiquer que la consommation énergétique des machines-outils dans leur phase d'utilisation représente une part importante de leurs impacts environnementaux. Diaz *et al.* montrent ainsi que la consommation énergétique en utilisation d'une machine d'usinage peut représenter 60% du bilan énergétique de l'ensemble de son cycle de vie [8]. Santos *et al.* montrent de leur côté que l'énergie consommée en utilisation par une machine d'usinage peut représenter 46% de son impact environnemental total (exprimés selon l'indicateur environnemental EI99 [9]) [10]. Kellens *et al.* montrent également que la consommation électrique représente 47% des impacts du procédé d'usinage par électroérosion mis en œuvre par la machine qu'il étudie (exprimés selon l'indicateur environnemental ReCiPe [11]) [12].

Mais les machines-outils dépendent également des systèmes support fournissant les conditions nécessaires à l'accomplissement de leurs fonctions. Ces systèmes, à travers la régulation de la température, de la lumière, la fourniture d'air comprimé, de vapeur, de sources alternatives de puissance, etc., représentent en Europe plus de 35% de la totalité des consommations énergétiques de l'industrie [13]. Nous pouvons donc considérer l'énergie de fabrication d'un produit comme une combinaison de consommations directes, de la part des machines participant à sa fabrication, et de consommations indirectes, de la part des systèmes supportant ces machines [14].

Nous pouvons ensuite faire une seconde distinction entre les consommations directement imputables à un produit et celles qu'il est nécessaire d'allouer entre les produits d'une série. Les consommations des machines outils sont dynamiques ; elles dépendent de l'état de la machine et des tâches qu'elle effectue [14]. Celles-ci ne participent pas toutes directement à la fabrication du produit : telles la phase de mise en route de la machine, son extinction, sa mise en veille, etc. Ces consommations additionnelles ne dépendent donc pas uniquement du produit à fabriquer, mais aussi de l'organisation de sa production. Nous faisons donc la distinction entre cette consommation additionnelle et la consommation directement relative à la réalisation d'un travail sur un produit.

Ainsi, nous pouvons identifier trois sources de consommation d'énergie en fonction de la nature du consommateur et de la cause de cette consommation :

- Consommation *opérationnelle* de la machine-outil, correspondant à la part de l'énergie consommée par la machine étant directement imputable à un produit. Ceci correspond aux modes productifs de la machine.

- Consommation *additionnelle* de la machine-outil, correspondant à la part de l'énergie consommée par la machine ne pouvant être directement imputable à un produit, et qui doit être allouée entre les produits. Ceci correspond aux modes non productifs de la machine, tels que le démarrage ou l'attente d'une opération à effectuer.

- Consommation *indirecte* induite par la machine outil, correspondant à la consommation de l'ensemble des systèmes support dont la machine bénéficie pour effectuer ses opérations.

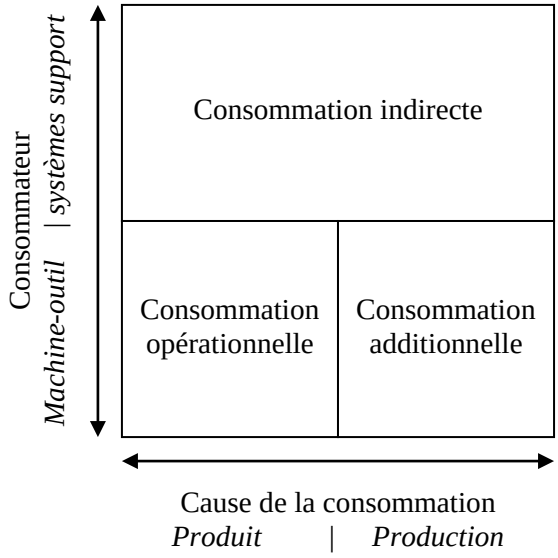

Figure 1 - Trois sources de consommation d'énergie

3 Etat de l'art des modèles de calcul de consommation

Dans cette section, nous présentons les indications de la littérature quant au lien existant entre la conception du produit et la consommation de sa fabrication. Nous nous limitons dans ce papier au cas des produits de l'industrie mécanique, ce secteur concentrant la majorité de la littérature sur ce sujet. Selon Elias *et al.*, l'énergie consommée par un équipement pour effectuer une tâche donnée est la somme 1) de l'énergie minimum théorique pour effectuer la tâche, limitée par les lois de la physique, 2) de l'efficacité intrinsèque de l'équipement et 3) de l'inefficacité de l'utilisation de l'équipement [15]. En transposant cette distinction dans le cadre de la consommation énergétique de la production, nous pouvons distinguer trois influences :

- *La définition des opérations de production*, qui est une combinaison de facteurs liés à la conception du produit (définissant des spécifications), et des machines à disposition de l'industriel (qui définissent la capacité à répondre aux spécifications).

- *L'énergie consommée par chaque machine pour chaque opération*, dépendant d'une part du minimum théorique d'énergie nécessaire à la réalisation d'une opération, mais également des inefficacités propres de la machine, qui met en œuvre des activités parallèles supportant le procédé de fabrication lui-même.

- *L'organisation de la production*, qui détermine si les machines sont utilisées ou non au maximum de leurs efficacités énergétiques, influençant ainsi en premier lieu les consommations additionnelles et indirectes.

3.1 Déterminer la liste des opérations

Les opérations à effectuer sont définies en fonction des caractéristiques attendues du produit et des capacités des machines disponibles pour les réaliser. Cette liste est le résultat du travail commun ou séquentiel de l'équipe de développement et de l'équipe d'industrialisation. La liste des opérations à mener est nécessairement définie dans le processus de conception et d'industrialisation du produit, quel que soit le niveau d'intégration de ces deux tâches dans l'entreprise, et peut donc être disponible pour le calcul de l'énergie de fabrication du produit.

Plusieurs auteurs ont proposé d'extraire ces données des logiciels de CAO/FAO (Conception et Fabrication Assistée par Ordinateur). Nawata et Aoyama proposent ainsi, pour calculer l'énergie relative à l'usinage de pièces mécaniques, d'extraire la liste des opérations d'usinage des outils CAO/FAO, dans lesquels sont définis les paramètres de coupe nécessaires à définir l'énergie consommée par chaque opération (choix de l'outil, avance et vitesse de coupe, etc.) [4]. Narita *et al.* suggèrent également d'intégrer directement ce calcul aux outils de CAO/FAO [16]. Avram et Xirouchakis quant à eux, ont développé un outil permettant de calculer l'énergie de coupe à partir du code CNC (Computer Numerical Control) généré par l'outil FAO [17].

Ces contributions montrent qu'il est possible de disposer des données nécessaires sur la définition des opérations de fabrication à effectuer. Une incertitude persiste toutefois sur le moment où sont disponibles ces informations dans le processus de développement du produit, ce dernier dépendant du niveau d'intégration des problématiques de production dans la conception du produit.

3.2 Déterminer l'énergie par opération

Dans la puissance instantanée consommée par une machine-outil, Rahimifard *et al.* distinguent la puissance théorique, relative à l'accomplissement d'une opération de production, porteuse de valeur ajoutée pour le produit, et la puissance auxiliaire, consommée par toutes les parties de la machine supportant la réalisation de cette opération (pompes hydrauliques, évacuations de fluides, commande numérique, etc.) [14]. Selon Li et Kara, dans le cas de l'usinage, il n'y a pas aujourd'hui de modèle satisfaisant permettant de prédire la consommation théorique à partir des paramètres de coupe [18]. Il note que les machines-outils sont des systèmes complexes dont il est difficile de prévoir la consommation avec des modèles théoriques, et plaide pour la recherche de modèles empiriques permettant de définir pour chaque machine une consommation énergétique spécifique (CES), c'est-à-dire l'énergie utilisée par une machine donnée pour réaliser une opération donnée. Dans le cadre de l'usinage, la CES est définie comme l'énergie relative à l'enlèvement d'un volume donné de matière.

De nombreuses études empiriques ayant étudié la consommation énergétique directe des machines-outils soulignent la présence d'une consommation fixe significative, qu'il s'agisse de machines de moulage par injection [19], d'usinage [20, 8, 21], de pliage [10] ou de prototypage rapide [22]. Les machines étudiées montrent une puissance consommée peu sensible à l'opération effectuée, si bien que les caractéristiques de cette dernière n'influent quasiment pas sur la CES. Kellens et Quintana ont montré dans deux exemples que la puissance théorique est marginale dans la puissance totale consommée d'une machine d'usinage [12,21]. La consommation auxiliaire, généralement fixe, est la consommation prépondérante, et le temps de traitement devient par conséquent le seul paramètre réellement influent sur la CES. Li a développé un modèle de prédiction de la consommation énergétique des machines d'usinage très symptomatique de ces résultats, pouvant obtenir des résultats précis tout en ne prenant en compte que la MRR (Material Removal Rate, la quantité de matière retirée du bloc à travailler par seconde), autrement dit, le débit de la machine [18].

Quelques nuances peuvent cependant être apportées à cette convergence, montrant que la consommation des machines-outils est liée à d'autres facteurs. Ainsi, Thiriez constate que, pour un même procédé (en l'occurrence le moulage par injection), deux machines de technologies différentes peuvent afficher des profils de consommation très différents [19]. Ainsi, alors qu'une machine hydraulique sera affectée par une forte puissance consommée fixe, et donc dont la consommation énergétique par opération sera grandement conditionnée par le temps de traitement, une machine

électrique aura une puissance consommée plus dynamique, et sera moins affectée par le temps de traitement. Il semble donc que la technologie de la machine soit un facteur important. Quintana observe également que la consommation fixe des machines d'usinage à haute vitesse est surtout due au refroidissement [21], nécessité par la haute vitesse de coupe, tandis que Santos observe que la consommation fixe des presse-plieuses dépend de la section maximale qu'elles peuvent plier [10]. Il semble donc que le dimensionnement de la machine soit également un facteur important.

Il n'est donc pas possible de ne considérer qu'un modèle unique ne prenant en compte que le débit de production pour toute machine. Il est probable au contraire que la similitude des profils de consommation ne soit qu'un effet conjoncturel dû à la marginalité du critère de consommation énergétique dans la conception des machines-outils. Il est également probable que l'attention de plus en plus grande portée à ce critère ait un effet sur la conception des machines-outils, et que cette homogénéité constatée dans leurs profils de consommation s'efface au profit d'une meilleure efficacité énergétique. Quoi qu'il en soit, afin de calculer l'énergie de fabrication d'un produit, il est nécessaire de disposer d'un modèle de consommation pour chaque machine que le produit fait intervenir, qu'il s'agisse d'un modèle générique avec des paramètres spécifiques à chaque machine, ou un modèle spécifique pour chaque machine. Un effort de la part de la communauté scientifique et des constructeurs de machines-outils est encore nécessaire, afin de fournir ces modèles et paramètres indispensables au calcul de l'énergie de fabrication des produits.

3.3 Prendre en compte la dynamique du système de production

Nous avons montré en section 2 qu'une partie de la consommation des machines et du système de production dans son ensemble n'est pas seulement conditionnée par les machines ou les produits, mais aussi par des choix de production, tels que l'ordonnancement des tâches ou la taille des lots. Herrmann et Thiede ont développé un simulateur permettant de prendre en compte la dynamique des systèmes de production, et ainsi de calculer l'énergie additionnelle consommée par les machines-outils, ainsi que celle consommée par les systèmes support [13]. Le simulateur permet une représentation réaliste du système de production, rendant compte des interdépendances et de la dynamique des équipements qu'il met en jeu. En considérant les machines comme des 'boites noires', le simulateur ne rentre pas dans les détails des procédés mis en œuvre, mais considère le profil de consommation des machines comme une donnée d'entrée. Combiné aux données que nous avons décrites dans les deux sous-sections précédentes, cet outil permet donc de lier, d'une part la définition de la liste des opérations, et d'autre part, les consommations de chaque machine pour chaque opération, afin d'obtenir la consommation énergétique relative à la production d'un produit.

4 Vers une estimation de l'énergie de production d'un produit en conception

Nous avons vu dans les sections précédentes que la littérature offre des éclairages intéressants quant aux différentes sources de consommation énergétique des systèmes de production. Les différentes bases théoriques et empiriques mises à dispositions par la communauté scientifique nous permettent d'en proposer un cadre unifié. Nous proposons dans cette section une méthode d'estimation de l'énergie de fabrication d'un produit, soutenue par un modèle de données nous permettant d'envisager une implémentation future dans un outil.

4.1 Méthode de calcul

Nous proposons dans cette section une méthode pour déterminer l'énergie de fabrication d'un produit. Cette méthode s'appuie sur quatre étapes, représentées par la Figure 2 et détaillées ci-dessous.

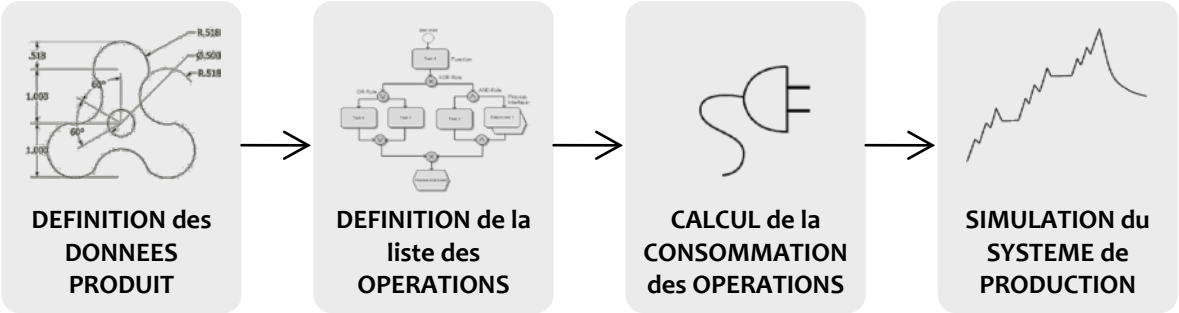

Figure 2 - Méthode de calcul de l'énergie de fabrication d'un produit

1. Définition des caractéristiques produit. De manière générale, dans l'industriel mécanique, la conception du produit est réalisée à l'aide d'un logiciel de CAO. Le produit y est défini comme un ensemble de formes (features) exprimées dans un langage géométrique propre au logiciel.

2. Définition des opérations à effectuer pour fabriquer le produit. Comme nous l'avons mentionné plus haut, l'ensemble des opérations est conditionné par la conception du produit et par les machines disponibles. Une opération est définie comme une unité de travail faisant intervenir une machine. Dans le cas de l'usinage, cette étape définit la suite des chemins que l'outil doit effectuer dans le bloc à usiner, ainsi que les paramètres de coupe de chacun d'eux (profondeur, vitesse et avance de coupe, choix de l'outil, etc.). Ceci peut être notamment fait au travers des outils de CAO/FAO.

3. Calcul de l'énergie relative à chacune des opérations. Elle est calculée en fonction du modèle de consommation de la machine choisie pour traiter l'opération, pouvant combiner des caractéristiques propres à la machine et à l'opération. Par exemple, le modèle empirique de consommation des machines d'usinage de Li et Kara contient trois paramètres, la MRR (Material Removal Rate), calculée à partir des paramètres de coupe, et deux paramètres liés à la machine [18].

4. Simulation du système de production. En plus de la définition des opérations, leur ordonnancement a un effet sur la consommation des machines et de leurs systèmes support, en définissant leurs phases de travail et d'attente. La méthode de simulation développée par [13] permet de modéliser l'ensemble du système de production, prenant en entrée la liste des taches et leurs consommations directes (calculées à l'étape précédente), et donnant en sortie l'énergie consommée par tout le système.

4.2 Modèle de données

La mise en œuvre de cette méthode requiert l'utilisation de données d'entrées, impliquant ainsi leur disponibilité. Afin de cibler ces dernières et d'identifier leurs sources et les outils qui peuvent les manipuler, nous proposons le modèle de données schématique présenté en Figure 3 sous le format UML. Une pièce d'un produit est décrite dans un logiciel de CAO comme un objet *Part*, c'est-à-dire un modèle 3D, composé d'un ensemble de *Features* qui décrivent la géométrie de la pièce. La pièce est fabriquée par la réalisation d'une *Gamme de fabrication*, lui-même défini par une liste d'*Opérations*. Une opération est une unité de traitement d'une ou plusieurs features par une (et une seule) *Machine*. Une feature peut être traitée par une ou plusieurs opérations, de même qu'une opération peut traiter une ou plusieurs features. Afin de calculer sa consommation énergétique, à chaque machine correspond un *Modèle de consommation*. Un modèle de consommation peut correspondre à plusieurs machines, mais les paramètres de ce modèle sont propres à chaque machine.

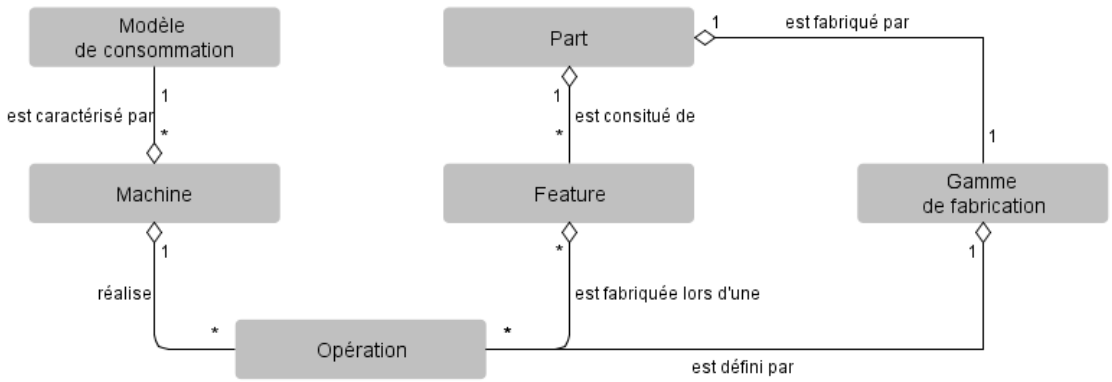

Figure 3 - Modèle de données

Les objets *part* et *features* sont clairement identifiés dans les logiciels de CAO. Les objets *opérations*, sont quant à eux possiblement des objets manipulables par les logiciels de FAO, et leur définition requiert les compétences des métiers d'industrialisation. Cependant, en fonction du niveau d'intégration des problématiques de fabrication en conception, l'utilisation de ces logiciels peut arriver trop tard dans le processus de conception pour que les résultats d'une prévision énergétique puissent être utilisés dans la conception du produit. Il est également envisageable que le concepteur définisse ces opérations directement dans l'outil CAO afin de pouvoir réaliser une estimation de la consommation au plus tôt, au risque que celle-ci soit simplifiée. Se pose donc un dilemme entre la qualité et la temporalité de la définition des opérations de fabrication. Afin de traduire ce modèle dans un outil utilisable par les concepteurs, cette question doit être approfondie.

Les objets *machine* et *modèle de consommation* ne sont aujourd'hui portés par aucun outil, et posent également à ce titre un problème de disponibilité. Bien que la communauté scientifique ait commencé à s'intéresser à la consommation des machines outils, peu de modèles satisfaisants sont aujourd'hui disponibles. L'installation de systèmes de surveillance de la consommation de la production est coûteuse, et ne permettrait qu'à grands frais de disposer de bases de données de modèles de consommation. Une telle solution ne serait de plus pas efficace d'un point de vue global, chaque industriel devant constituer sa base de modèles sur des machines qu'il a pourtant en commun avec d'autres. Nous sommes donc de l'avis de Li et Kara qui plaident pour une définition de ces modèles par les fabricants de machines-outils [18].

5 Conclusions

Nous avons montré à l'aide de la littérature existante que les données nécessaires au calcul de l'énergie de fabrication d'un produit sont potentiellement disponibles dès sa conception, et avons soulevé les conditions de leur disponibilité. Les consommations des équipements de production sont aujourd'hui mal connues, et leur mise à disposition est une étape indispensable dans la démarche présentée par cet article. Parallèlement, la définition en conception des opérations de production appelle à une plus grande intégration des tâches de conception et de planification de la production.

En nous appuyant sur les réponses fragmentaires apportées par la littérature, nous avons défini un cadre théorique unifié permettant de calculer l'énergie nécessaire à la fabrication d'un produit. La connaissance de cette donnée devrait permettre de supporter à la fois les démarches d'éco-conception de produit et de réduction des consommations des systèmes de production. Elle devrait permettre, d'une part, de distinguer les contributions relatives des systèmes consommateurs au sein des unités de production (nommément les différentes machines outils et leurs systèmes support), et d'autre part, d'identifier les paramètres de conception du produit qui influencent la consommation du système de production. Des communications ultérieures viendront présenter une implémentation de ce cadre, illustrée par des exemples concrets, au travers d'un outil de calcul de la consommation relative à la fabrication d'un produit.

Remerciements

Les auteurs du présent article tiennent à remercier la Région Rhône-Alpes qui a partiellement financée ces travaux.

Références

[1] EUROSTAT, COMMISSION EUROPEENNE, “Energy, transport and environment indicators”, Office for Official Publications of the European Communities, Luxemburg, ISSN 1725-4566, 2007.

[2] E. MÜLLER, J. ENGELMANN, T. LÖFFLER, S. JÖRG, “Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben”, Springer Verlag, ISBN 978-3-540-89643-2, 2009.

[3] J. HESSELBACH, C. HERRMANN, R. DETZER, L. MARTIN, S. THIEDE, B. LÜDEMANN, “Energy Efficiency through optimized coordination of production and technical building services”, Actes de : 15th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, pp624-628, Sydney, Australie, 17-19 mars 2008.

[4] S. NAWATA, T. AOYAMA, “Life-cycle design system for machined parts - linkage of LCI data to CAD/CAM data”, Actes de : Second International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, pp. 299-302, Tokyo, Japon, 11-15 décembre 2001.

[5] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, “ISO 14040:2006 - Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework”, 2006.

[6] Y. SEOW, S. RAHIMIFARD, “Improving Product Design based on Energy Considerations”, Actes de : Actes de : 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, pp. 154-159, Brunswick, Allemagne, 2-4 mai 2011.

[7] Z. TAHA, H. KURNIATI, H. AOYAMA, R. A. GHAZILLA, J. GONZALES, N. SAKUNDARINI, “Linkage of power consumption to design feature on turning process”, Actes de : 10th WSEAS International Conference on Robotics, Control and Manufacturing Technology, Hangzhou , Chine, avril 2010.

[8] N. DIAZ, E. REDELSHEIMER, D. DORNFELD, “Energy Consumption Characterization and Reduction Strategies for Milling Machine Tool Use”, Actes de : 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, pp. 263-267, Brunswick, Allemagne, 2-4 mai 2011.

[9] M. GOEDKOOP, R. SPRIENSMA, “The Eco-indicator 99 – A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment – Methodology report”, 2001

[10] J. P. SANTOS, M. OLIVEIRA, F. G. ALMEIDA, J. P. PEREIRA, A. REIS, “Improving the environmental performance of machine-tools: influence of technology and throughput on the electrical energy consumption of a press-brake”, Journal of Cleaner Production, Vol. N° 19, 2011, pp. 356-364.

[11] M. GOEDKOOP, R. HEIJUNGS, M. HUIJBREGTS, A. DE SCHRYVER, J. STRUIJS, R. VAN ZELM, “ReCiPe 2008 - A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level”, 2009

[12] K. KELLENS, R. RENALDI, W. DEWULF, J. DUFLOU, “Preliminary Environmental Assessment of Electrical Discharge Machining, Actes de : 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, pp. 377-382, Brunswick, Allemagne, 2-4 mai 2011.

[13] C. HERRMANN, S. THIEDE, “Process chain simulation to foster energy efficiency in manufacturing”, CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, Vol. N°1, 2009, pp. 221-229.

[14] S. RAHIMIFARD, Y. SEOW, T. CHILDS, “Minimising Embodied Product Energy to support energy efficient manufacturing”, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. N° 59, 2010, pp. 25–28.

[15] E. ELIAS, E. DEKONINCK, S. CULLEY, “Quantifying the Energy Impacts of Use: A Product Energy Profile Approach”. Actes de : 16th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, Le Caire, Egypte, 6 mai 2009.

[16] H. NARITA, H. KAWAMURA, T. NORIHISA, L. CHEN, H. FUJIMOTO, T. HASEBE, “Development of Prediction System for Environmental Burden for Machine Tool Operation”, JSME International Journal Series C, Vol. N°49(4), 2006, pp.1188-1195.

[17] O. I. AVRAM, P. XIROUCHAKIS, “Evaluating the use phase energy requirements of a machine tool system”, Journal of Cleaner Production, Vol N°19, 2011, pp. 699-711

[18] W. LI, S. KARA, “An empirical model for predicting energy consumption of manufacturing processes: a case of turning process”, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, Vol N°225(9), 2011, pp. 1636-1646.

[19] A. THIRIEZ, T. GUTOWSKI, “An Environmental Analysis of Injection Molding”, Actes de : IEEE International Symposium on Electronics and the Environment, Scottsdale, Arizona, 8-11 mai 2006.

[20] S. KARA, W. LI, “Unit process energy consumption models for material removal processes”, CIRP Annals-Manufacturing Technology, Vol. N° 60(1), 2011, pp. 37-40.

[21] G. QUINTANA, J. CIURANA, J. RIBATALLADA, “Modelling Power Consumption in Ball-End Milling Operations”, Materials and Manufacturing Processes, Vol. N°26, 2011, pp. 746-756.

[22] P. MOGNOL, D. LEPICART, N. PERRY, “Rapid prototyping: energy and environment in the spotlight”, Rapid Prototyping Journal, Vol. N°12(1), 2006, pp.26-34.