

Evaluation du degré de mécatronicité d'un produit

Laurent Tabourot
Univ. Savoie Mont Blanc,
SYMME, F-74000 Annecy, France
laurent.tabourot@univ-smb.fr

Leonida Granon
Univ. Savoie Mont Blanc,
SYMME, F-74000 Annecy, France
leonida.granon@univ-smb.fr

Pascale Balland
Univ. Savoie Mont Blanc,
SYMME, F-74000 Annecy, France
pascale.balland@univ-smb.fr

El-Housseine El-Hamed
Univ. Savoie Mont Blanc,
SYMME, F-74000 Annecy, France
el-housseine.el-hamed@edu.supmecca.fr

Résumé—*Le contexte global de cette étude est l'identification des caractéristiques remarquables d'organisations capables de concevoir et produire des produits très complexes. Le point de départ est donc d'appréhender la complexité d'un produit. C'est pourquoi on propose des métriques, fondées notamment sur l'évaluation des solutions technologiques adoptées pour répondre aux besoins fonctionnels. L'objectif est de construire progressivement un référentiel pour permettre aux PME traditionnelles de se situer et définir les plans stratégiques d'évolutions leur permettant d'accéder au prometteur marché des produits mécatroniques.*

Mots-clés—*produit mécatronique, métriques, analyse fonctionnelle*

I. INTRODUCTION

La mécatronique est un terme apparu pour la première fois en 1969 pour répondre au besoin de définir une activité industrielle de développement de produits hybrides intégrant, de façon poussée et inédite jusque-là, des technologies utilisées plutôt séparément jusqu'alors. Ce courant qui vise à concevoir et fabriquer des produits intégrés a continué à se développer à un point tel que de nos jours, la périmètre de la mécatronique recouvre beaucoup de nos objets quotidiens ou industriels et permet par exemple le développement de l'internet des objets identifié à lui-même comme un secteur à très forte croissance dans un futur à très court terme.

A ce stade, il convient de préciser qu'en tant que "nom", le mot mécatronique définit l'ingénierie de conception visant l'intégration en synergie de la mécanique, l'électronique, l'automatique et l'informatique dans la conception et la fabrication d'un produit en vue d'augmenter et/ou d'optimiser sa fonctionnalité.

S'il est employé comme un "adjectif", il est souvent associé à un produit présentant un niveau complet et élevé d'intégration technologique et ayant simultanément la capacité de percevoir son milieu environnant, de traiter l'information, de communiquer et d'agir sur son milieu. Deux normes françaises (NF 01 010 et XP E 01 013) précisent d'une part la

terminologie relative à la mécatronique et d'autre part le cycle de vie des produits mécatroniques. Il n'y a pas eu de normes supplémentaires et la norme expérimentale apparaît comme annulée sur le site de l'Afnor.

Pour tout produit relevant de la sphère des objets connectés complexes (ou mécatronique donc), chaque composant devient un sous-système mécatronique ou est un système mécatronique à part entière. Compte-tenu des prévisions de croissance économique en la matière, il est alors certain que de nombreuses petites et moyennes entreprises (PME) manufacturières de filière (décolletage, emboutissage...) du secteur de la sous-traitance seront amenées à développer à très court terme des activités industrielles relevant de l'ingénierie mécatronique, ne serait-ce que pour être en mesure de répondre aux besoins en composants évolués de leurs donneurs d'ordre qui ont déjà pris la voie de la mécatronique en tant que pionnier tout d'abord, puis de façon régulière actuellement. Elles vont donc être conduites à adopter une organisation et des processus qui lui permettront d'aboutir à la production de produits mécatroniques pour s'intégrer dans la dynamique économique provoquée par le développement de ces systèmes hautement intégrés technologiquement. Il s'agira alors pour ces PME d'être "qualifiées" en tant que fournisseur mécatronique vis-à-vis de leur donneur d'ordre. Si dans les grands groupes et la plupart des entreprises de tailles intermédiaires, il y a donc déjà en place une organisation et des processus spécifiques qui ont permis la réalisation de produits mécatroniques emblématiques à grande diffusion (roulement instrumenté par exemple), il n'en reste pas moins que cette tendance n'est pas généralisée pour la grande majorité des PME. Par ailleurs, les processus des entreprises de grande taille ne sont pas forcément transposables directement aux petites entreprises compte tenu des nombreuses différences d'organisation et de disponibilité des ressources. Il n'est donc pas possible d'envisager un transfert direct et rapide de l'expérience du donneur d'ordre vers son sous-traitant.

La question qui se pose alors à la PME traditionnelle de filière n'ayant pas encore pris ce virage est d'identifier quelle est l'organisation optimale à mettre en place pour supporter les processus de conception de produits définis comme mécatroniques. Les PME, peu nombreuses encore, qui ont

intégré des processus de développement mécatroniques et qui ont acquis une maturité certaine dans ce domaine ont amorcé cette mutation il y a une dizaine d'années déjà. Si cela permet d'avoir un premier retour d'expérience en analysant les modes de fonctionnements de ces "champions mécatroniques", il n'existe pas cependant de vadémécum de l'entreprise mécatronique sur lequel pourrait s'appuyer les entreprises qui ne le sont pas. Les normes au sujet de la mécatronique, citées plus haut, sont essentiellement qualitatives et ne contiennent pas d'éléments organisationnels sur lesquels s'appuyer de façon pragmatique pour définir une feuille de route pragmatique afin d'opérer cette conversion.

Cet article est une courte synthèse de la première partie d'une étude plus globale qui vise à identifier et démocratiser un référentiel organisationnel de la mécatronique pour les entreprises. Le principe de l'étude est d'ébaucher ce référentiel en s'appuyant sur les canons d'organisation communs, s'ils sont identifiables, déjà adoptés par les entreprises ayant déjà une activité notable dans le domaine de la mécatronique.

Cette étude est notamment menée dans la perspective de fournir des outils aux PME envisageant d'évoluer d'une activité sectorielle mono domaine donc vers une activité mécatronique multi technologies. Elle est soutenue à la fois par *l'Assemblée des Pays de Savoie* et par le *Fonds pour l'Innovation dans l'Industrie* de l'UIMM. Elle s'effectue sous l'égide du groupe de travail mécatronique du Syndicat des industriels de la mécatronique Artema.

Afin d'évaluer tout d'abord le plus objectivement possible le niveau des entreprises mécatroniques, l'étude propose donc en prérequis d'évaluer le produit (ou des produits) existant(s) d'entreprises identifiées a priori comme étant "mécatroniques" et de l'utiliser comme un indicateur global de leur performance en ingénierie mécatronique visible. Afin de déterminer ce niveau de performance dans la pratique mécatronique, on propose alors définir des métriques à partir des caractéristiques du produit : il s'agit alors de définir son degré de "mécatronicité". L'objectif est d'établir ensuite une corrélation entre ce degré de mécatronicité du produit et l'organisation (non visible de l'extérieur a priori) qui a permis de concevoir et fabriquer un tel produit. Les règles qui en découlent serviront à définir un référentiel mécatronique permettant de labelliser les entreprises relevant de cette activité. Compte tenu de la cible, les PME, et les contraintes qui s'y rattachent, l'objectif est de proposer des outils d'analyse applicables et suffisamment opérationnels pour être diffusés à ces acteurs ; en effet, ces derniers ne souhaitent pas, du moins dans un premier temps, s'approprier des outils trop lourds à mettre en œuvre.

Cette étude est menée avec un panel d'entreprises faisant référence dans le domaine de la mécatronique. Toutefois, compte tenu de la portée stratégique et de la sensibilité des informations relativement à la concurrence, les données spécifiques à ces entreprises pilotes pour construire le référentiel ne sont pas communicables dans le cadre d'une publication scientifique dont la vocation est d'être diffusée le plus largement possible ; seuls les éléments à caractère générique peuvent être présentés. On utilise pour cela un produit mécatronique un peu simple (un aspirateur

automatique) qui nous semble pertinent pour illustrer la démarche développée et les métriques définies.

L'analyse des normes (NF 01 010 et XP E 01 013) nous incite à privilégier des orientations pour proposer des métriques car elle retient en particulier deux axes pour positionner les produits mécatroniques.

L'intégration physique définit l'intégration des supports mécaniques et électroniques. D'une manière plus étendue, elle indique que les fonctions d'un produit mécatronique résultent de la combinaison de composants de technologies multi-domaines.

L'intégration fonctionnelle définit, quant à elle, l'apport de fonctions supplémentaires de détection, de communication, de traitement de l'information et de rétroaction aux fonctions mécaniques de base.

Pour qualifier un produit mécatronique, les normes nous amènent donc nécessairement à tenir compte en premier lieu des fonctions du produit. La méthode proposée ici s'appuie donc préalablement sur la définition fonctionnelle du produit. La quantification du niveau d'intégration physique ou fonctionnelle requiert ensuite d'identifier et recenser les composants et leur domaine technologique utilisés pour satisfaire les fonctions identifiées du produit. Cela revient donc à évaluer les flux fonctionnels pour chaque composant. Une fois ces flux établis, il est alors possible d'évaluer différents indicateurs quantifiant le niveau de mécatronicité du produit.

II. DEFINITION FONCTIONNELLE DU PRODUIT

Le produit retenu pour illustration est un aspirateur automatique donné sur la Figure 1.

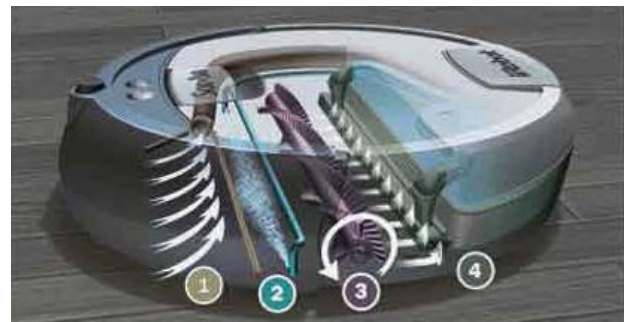


Figure 1. EXEMPLE DE PRODUIT MECATRONIQUE RETENU POUR L'ETUDE : UN ASPIRATEUR AUTOMATIQUE
([HTTPS://LAETROBOTIQUEDEDEMAIN.WORDPRESS.COM/III-LES-ROBOTS-DAUJOURD'HUI-ET-DE-DEMAIN/](https://laetrobotique.de.demain.wordpress.com/iii-les-robots-daujourd'hui-et-de-demain/)).

La définition fonctionnelle du produit doit être conforme à la norme X50-151. Elle s'établit selon un cahier des charges fonctionnelles qui définit un besoin précis décliné en fonction de services et contraintes.

Un support pratique de l'identification des fonctions par grandes étapes du cycle de vie produit est sans doute le diagramme pieuvre qui définit la fonction que doit remplir le produit vis-à-vis d'éléments de l'environnement.

Ainsi, la Figure 2 et le Tableau 1 illustrent respectivement le diagramme pieuvre et les fonctions retenues pour notre exemple, l'aspirateur automatique.

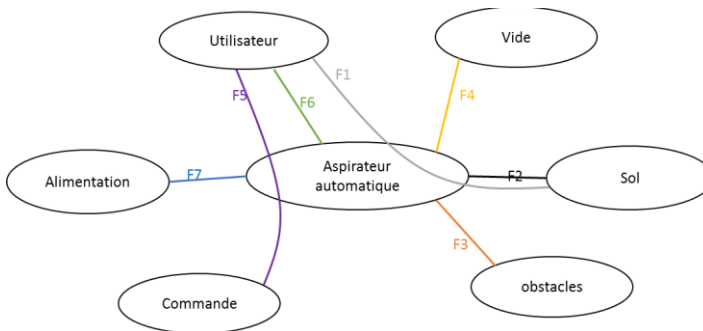


Figure 2. DIAGRAMME PIEUVRE DEFINISSANT UN ASPIRATEUR AUTOMATIQUE. LES FONCTIONS DU PRODUIT IDENTIFIEES SONT PRESENTEES DANS LE TABLEAU 1.

F1	Aspirer le sol
F2	Se déplacer en autonomie
F3	Eviter les obstacles
F4	Eviter le vide
F5	Changer dynamiquement les paramètres
F6	Gérer intelligemment l'énergie
F7	Se charger si besoin est

Tableau 1. LISTE DES FONCTIONS RETENUES POUR L'ASPIRATEUR AUTOMATIQUE.

La figure 2 présente le diagramme pieuvre qui permet d'identifier les 7 fonctions exemples de notre produit. CE diagramme est établi pour la phase d'utilisation standard de l'appareil. Dans cette optique on a recensé les éléments en contact "physique" avec le produit. On identifie le lien fonctionnel que crée le produit avec les éléments de l'environnement. Si l'on procède ainsi, l'intérêt de ce type de diagramme est qu'il identifie les relations fonctionnelles que doit supporter le produit relativement à son environnement physique. A ce stade, le produit est une boîte noire dont le contenu sera précisé par la conception.

III. FLUX FONCTIONNELS

Il est ensuite nécessaire de disposer du plan d'ensemble de la solution conçue par l'entreprise. La nomenclature permet alors d'identifier les composants utilisés par l'entreprise pour fabriquer son produit.

Le diagramme des flux fonctionnels (Figure 3) s'établit alors en recensant les composants qui supportent les différentes fonctions du produit (Tableau 1). Il s'agit en fait d'explicitier technologiquement le diagramme pieuvre en regardant comment sont supportées technologiquement les différentes fonctions. Cela revient à détailler le contenu de la boîte noire et à regarder comment s'établissent les flux fonctionnels sur les différents composants (par composant, on entend groupement de pièces répondant aux mêmes fonctions). On a effectué ici une décomposition assez triviale du produit. Cette partie est un

élément clé de la méthode qui doit s'appuyer réellement sur la définition des composants telle que la perçoit l'entreprise concernée.

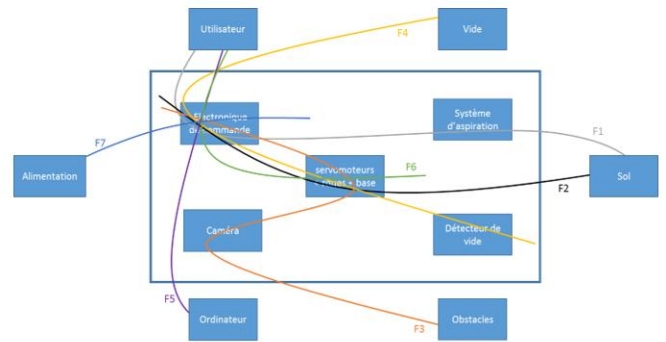


Figure 3. DIAGRAMME DE FLUX FONCTIONNEL DE L'ASPIRATEUR AUTOMATIQUE.

A partir de ce diagramme des flux (Figure 3), il est pertinent de construire le tableau d'incidence (Tableau 2) dans lequel sont répertoriés les composants et les fonctions. Cette représentation est objective, indépendante de celui qui étudie le produit, et simple à mettre en œuvre, elle ne fait pas appel à des outils spécifiques. Elle est alors le point de départ pour la définition d'indicateurs ou de métriques définissant le degré de mécatronicité du produit.

Composants \ Fonctions	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
Servomoteurs + Roues + base		X	X	X		X	
Carte électronique de commande	X	X	X	X	X	X	X
Caméra			X				
Détecteur de vide				X			
Système d'aspiration	X						

Tableau 2. TABLEAU D'INCIDENCE POUR L'ASPIRATEUR AUTOMATIQUE.

IV. METRIQUES MECATRONIQUES

Ce travail de définition de métriques a déjà été entrepris au cours de travaux de thèse [1-2]. Les métriques proposés dans cet article sont plus orientées sur les fonctions identifiées auparavant que ceux présentés dans [1] et sont plus simples à mettre en œuvre que ceux de [2], où la maîtrise de langage de modélisation évolué comme le SysML est nécessaire. L'ambition de ce projet, est rappelons-le, de s'adresser à des PME pas forcément armées dans ce domaine.

Ce papier doit s'envisager comme proposition de premières versions de métriques permettant d'évaluer les produits. La présentation ici vise à détailler plus particulièrement 3 métriques emblématiques pour rendre compte de l'intégration physique, l'intégration fonctionnelle et le degré de dématérialisation du produit. Ces trois caractéristiques sont globalement centrales pour les produits mécatroniques selon la norme.

A. Indicateur d'intégration physique

Pour répondre à la dimension intégrée de la norme, chaque fonction est étudiée en listant le nombre de domaines technologiques présents qu'il est nécessaire de combiner pour que le produit puisse la remplir.

Ici, on élargit quelque peu le concept initial de la mécatronique en élargissant le spectre des technologies considérées. Les domaines technologiques d'un produit mécatronique sont les 8 suivants : *mécanique, électronique, automatique, informatique, optique, hydraulique, magnétisme et Thermique*.

Le Tableau 3 indique alors le nombre d'interactions possibles en fonction du nombre de domaines nécessaire pour réaliser un produit donné. Il nous semble plus pertinent de prendre en compte les couplages entre domaines que le nombre de domaines.

Nombre de domaines	1	2	3	4	5	6	7	8
Nombre de couplages possibles	0	1	3	6	10	15	21	28

Tableau 3. TABLEAU DES COUPLAGES DE 3 DOMAINES POSSIBLES EN FONCTION DU NOMBRE DE DOMAINES PRESENTS.

L'indicateur d'intégration fonctionnelle ICF est alors défini par l'équation (1) ci-dessous. Il est construit pour évoluer entre 0 et 1.

$$\text{éq. (1): } ICF = \frac{1}{28} \frac{\sum_{FC} \text{Nombre de couplages par fonction}}{\text{Nombre de fonctions}}$$

Il a calculé pour le produit "générique" choisi comme exemple et vaut 0,2. Cette valeur est donc plutôt faible dans le cas présent. Cet indicateur vise à être relié assez directement à l'organisation qu'il convient de déployer dans l'entreprise pour la conception et la fabrication d'un produit mécatronique.

B. Indicateur d'intégration

Grâce au tableau d'incidence (Tableau 2), l'indicateur IntegMax est déterminé à partir de l'équation (2).

$$\text{éq. (2): } IntegMax = \frac{\sum_{fonctions} \text{Nombre de composants par fonction}}{\text{Nombre de fonctions}} - 1$$

La valeur trouvée pour l'aspirateur automatique est de 0,17.

Ce qu'il faut comprendre sur cet indicateur :

IntegMax= 1 : chaque composant du système contribue à la réalisation de toutes les fonctions remplies par le produit (très forte intégration). Le système devient un seul composant à part entière.

IntegMax= 0 : le système est modulaire car chaque fonction est réalisée par un seul composant du système.

Notre produit est donc plus proche du produit modulaire qu'intégré. Il a été montré par l'étude de plusieurs produits que ces deux types de configuration cohabitent pour des produits mécatroniques.

C. Indicateur de dématérialisation

Cet indicateur est défini comme le ratio du nombre de fonctions intégrant EIA (fonctions liées à la dématérialisation du produit), soit l'électronique, l'informatique, l'automatique sur le total de fonctions comme défini dans l'équation (3).

$$\text{éq. (3): } DemMax = \frac{\text{Nombre de fonctions EIA}}{\text{Nombre de fonctions du produit}}$$

Compte tenu de la configuration adoptée, ici on trouve un produit avec un fort taux de dématérialisation (proche de 1 ou 1 selon la classification qui peut se discuter). On peut affiner la description en définissant des indicateurs partiels à partir des rubriques proposées ci-dessus.

V. CONCLUSIONS

Dans cette synthèse, on propose les 3 métriques principales qui permettent d'évaluer le degré de réalisation. Elles sont complétées par un panel d'indicateurs complémentaires non présentés ici en lien avec le volume du produit, les possibilités de communication, la gestion de l'énergie ou les contraintes techniques induites par la conception. Par construction, plus ces indicateurs sont élevés, plus le produit est mécatronique, plus il faut des méthodes spécifiques de conception et industrialisation. Ces indicateurs sont alors évalués avec les produits des entreprises du panel permettant d'avoir une estimation quantitative du niveau global mécatronique leurs produits. Leurs processus de conception sont alors mis en corrélation avec le niveau atteint sur chaque indicateur. Les travaux qui visent à déterminer un référentiel mécatronique au niveau de l'organisation sont en cours de finalisation dans le cadre de la thèse au cours de laquelle sont traitées ces questions. Il ressort d'ores et déjà que les entreprises concernées ont des organisations spécifiques, inédites. Ces organisations sont par ailleurs intermédiaires, car il ressort également que les modèles d'affaires des entreprises matures dans le domaine de la mécatronique intègrent assez rapidement d'autres modes de valorisations de leurs activités, comme la servicisation par exemple : vente de service en exploitant les données produites par les produits mécatroniques.

VI. REFERENCES

- [1] S. Turki, Ingénierie système guidée par les modèles: Application du standard IEEE 15288, de l'architecture MDA et du langage SysML à la conception des systèmes mécatroniques. Thèse de doctorat université de Toulon, octobre 2008.
- [2] A. Warniez, Métriques d'intégration pour le choix d'architectures dans la conception des systèmes

