

Formalisation du cycle de vie des produits de l'Usine du Futur étendue: vers l'Ingénierie Système élargie

Mehdi YOUSSEF
Ecole Centrale de Lyon
Université de Lyon, ECL, INSA Lyon, UCBL, CPE,
INL, UMR5270, F-69134 Ecully, France
mehdi.youssef@ec-lyon.fr

David NAVARRO
Ecole Centrale de Lyon
Université de Lyon, ECL, INSA Lyon, UCBL, CPE,
INL, UMR5270, F-69134 Ecully, France
david.navarro@ec-lyon.fr

Patrick SERRAFERO
Ecole Centrale de Lyon
Laboratoire LTDS
Ecully, France
patrick.serrafero@ec-lyon.fr

Maxime FRACHON
Société CIRLY
Brignais, France
frachon@cirly.com

Résumé— *Toute entreprise vise quotidiennement à améliorer sa performance, par exemple par des améliorations et des actions correctives, par la mise en place de méthodes organisationnelles nouvelles et/ou par le déploiement et l'exploitation d'outils numériques en corrélation avec les besoins internes de l'entreprise.*

Le modèle proposé dans cet article - dit "modèle Racine Carrée du cycle de vie" - vise à offrir une vision aussi détaillée que globale du cycle de vie complet d'un produit industriel. Il permet de créer une feuille de route méthodologique capable d'accueillir des systèmes/outils électroniques (i.e.: RFID, WSN, M2M, ...), de les coupler avec les outils informatiques de l'entreprise (i.e.: ERP, MES, ...) afin de créer un lien sécurisé entre les données produites par les différents acteurs d'une chaîne de valeur et ainsi contribuer à la création d'une richesse cognitive significative. Cet article présente également le cas d'usage du modèle proposé appliqué à la chaîne de valeur des cartes électroniques.

Le modèle du cycle de vie en racine carrée proposé ici est assez générique pour pouvoir être adopté par des PME, des ETIs ou des Grands Groupes. Nous en présentons donc les différentes phases constitutives, ainsi que la valeur ajoutée qu'il apporte à une chaîne de valeur industrielle.

Mots-clés— *Usine du Futur, Cycle de vie de produit industriel, Chaîne de valeur industrielle, Modèle en "racine carrée", Ingénierie Système, PLM, RFID, WSN.*

I. INTRODUCTION

L'intensification de la concurrence couplée à l'évolution accélérée des technologies aboutissent à une complexification sans précédent du processus de conception, de développement et de lancement d'un produit industriel. En conséquence, le produit et son développement ne sont plus l'œuvre d'une seule équipe ou d'une seule entreprise, mais résultent bien souvent d'un travail collaboratif d'équipes pluridisciplinaires coordonnées autour des objectifs de réalisation du produit [1].

Les efforts d'amélioration ont longtemps été porté sur l'outil de production mais, avec la saturation des marchés, la contrainte dominante a évolué vers d'autres considérations et, plus particulièrement, vers la maîtrise du patrimoine de connaissances industrielles. En effet, ce patrimoine constitue un puissant levier d'amélioration des performances [2].

Par ailleurs, l'Usine du Futur vise notamment - au travers des objets connectés (i.e.: **IoT: Internet of Things**) - à améliorer l'industrie en termes de sécurité, d'interactivité plus rapide, d'interopérabilité, d'amélioration de la connectivité entre la couche physique et la couche métier, à apporter une meilleure qualité de supervision et à promouvoir de nouveaux concepts de gestion des périphériques et des données [3]. En prenant en considération l'influence de la chaîne de valeur d'un produit industriel nouveau sur la performance économique de ses différents contributeurs, nous proposons un nouveau modèle de gestion du cycle de vie d'un produit, dit en "**racine carrée**" et relevant d'une approche **PLM étendu** (i.e.: **Product Lifecycle Management**) compatible avec le cycle en V de l'Ingénierie Système.

Cet article présente le concept du modèle "**racine carrée**" qui se propose d'être couplé à des architectures basées sur des SOA (**Service Oriented Architecture**) et des objets connectés adaptés à la chaîne de valeur ciblée.

II. DESCRIPTION DU MODELE PLM EN "RACINE CARREE"

La Fig. 1 formalise l'apport de valeur ajoutée en termes de données tout au long du cycle de vie d'un produit industriel sous la forme d'une "racine carrée". Ce modèle innovant - compatible avec le modèle "**Cycle en V**" de l'Ingénierie Système - présente une structure générique qui peut s'appliquer à tout produit industriel [15].

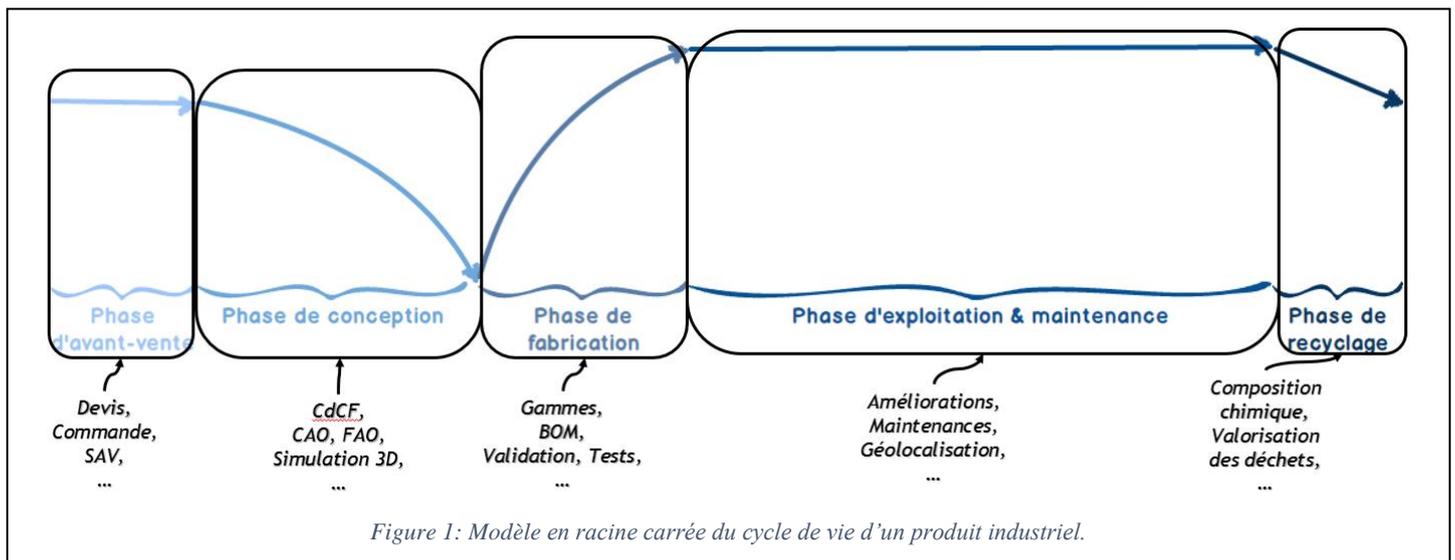
Il est constitué de cinq phases principales :

- **Avant-vente:** cette phase ouvre une porte de communication entre le client et le concepteur où toutes les données relatives à la négociation commerciale et une commande peuvent être capitalisés (i.e.: demande de devis, bon de commande, ...) ainsi que les retours clients en exploitant ce volet comme outil de SAV (*Service Après-Vente*),
- **Conception:** cette phase regroupe toutes les données de conception et d'ingénierie numérique d'un produit industriel. Nous pouvons par exemple utiliser un modèle 3D manipulable afin que la carte électronique soit facilement identifiable,
- **Fabrication:** durant cette phase, l'industriel fabriquant le produit en question peut facilement récupérer et exploiter les données du concepteur et

opérateur, objectif de l'opération, résultat, illustration, ...).

- **Recyclage:** cette phase permet de valoriser les matériaux et éléments chimiques constituant le produit.

Ainsi, le modèle PLM en "racine carrée" permet d'assurer une conception des produits en mode collaboratif: toutes les disciplines travaillent simultanément, et non successivement sur les parties qui les concernent. Les simulations deviennent plus réalistes, en prenant en compte d'avantages de paramètres fournis par les autres acteurs, ce qui permet de simuler le comportement du produit complet. Cette version virtuelle est bien évidemment partagée avec l'ensemble des contributeurs de la chaîne de valeur et permet de récupérer très en amont des



renseigner les différentes opérations et paramétrages effectués pendant cette phase de production. La capitalisation de ces informations permet alors la réalisation d'une reproduction aisée d'un produit identique,

- **Exploitation & maintenance:** cette phase correspond à la période durant le plus longtemps par rapport aux autres phases. Les deux principales catégories de données susceptibles d'être capitalisées durant cette phase sont :
 - **Évolutions:** l'utilisateur peut alors garder une trace documentée de toutes les évolutions de son produit (ou d'un organe de son produit), par exemple l'import d'une nouvelle version du firmware ou l'ajout d'un nouveau module électronique, ..., **Opérations de maintenances:** l'utilisateur conserve les données de toutes les opérations de maintenance effectuées sur le produit et peut facilement accéder au suivi complet de ces opérations de maintenance (i.e.: date,

informations utiles aux disciplines connexes: gestion des homologations, formations, maintenances, SAV, ... [16]. Prenant en compte la moindre modification sur la chaîne de valeur, les différents contributeurs sont informés en temps réel à travers les outils du « *PLM commun* ».

L'instrumentation des équipements industriels permet par ailleurs sur une ligne propre à chaque automate, à chaque moteur, à chaque capteur ou à chaque variateur d'informer en temps réel les autres équipements de la ligne de son état et de leur fournir des données permettant de se paramétrer automatiquement, sans nécessité de passer par un système central, réduisant ainsi significativement le temps de réaction de l'ensemble. Les données générées par chaque contributeur atterrissent dans un entrepôt de données commun, celui du PLM dont la gestion des données est assurée par un système SI de type cloud. Chaque acteur possédant un login/mot de passe ainsi le droit d'accéder aux données du produit lui concernant. Par ce biais, la chaîne de valeur devient plus agile et plus réactive.

III. ECOSYSTEME DU MODELE RACINE CARREE

A. Modèle "racine carrée" comme modèle de PLM

Le PLM est considéré avant tout comme une stratégie organisationnelle d'entreprise [4]. En effet, il s'agit de collecter, de stocker, de traiter et de mettre à disposition toutes les données relatives à un produit industriel, sur l'intégralité de son cycle de vie, et ceci pour l'ensemble des acteurs d'une chaîne de valeur contribuant à son émergence et à son développement [5]. Une définition des plus répandues du PLM est la suivante: "A strategic business approach that applies a consistent set of business solutions in support of the collaborative creation, management, dissemination and use of product definition information across the extended enterprise from concept to end of life - integrating people, processes, business system and information" [6].

Le modèle de gestion du cycle de vie en "racine carrée" que nous proposons peut être considéré comme modèle de PLM car il a le même objectif que cette classe de ressources organisationnelles, à savoir: partager les informations relatives à un produit à chaque phase de son cycle de vie (CIMdata¹, 2008).

Un système de PLM permet d'encapsuler puis de diffuser les



Figure 2: Système PLM et applications métier (source : [7, p. 25])

informations nécessaires à la définition d'un produit. Cela s'effectue par le biais de connecteurs entre le système PLM utilisé et les autres systèmes d'informations et applications de l'entreprise, tels la CAO (*Conception Assistée par Ordinateur*), la FAO (*Fabrication Assistée par Ordinateur*), les logiciels de simulation numérique, l'ERP (*Entreprise Resources Planning*), le SCM (*Supply Chain Management*) (cf. Fig. 2), ... etc. Un tel dispositif numérique assure ainsi la continuité de l'information, sa traçabilité, son archivage et sa réutilisation [7].

La fonction principale d'un système de PLM consiste à mettre en lien les différentes applications métier, capitalisant ainsi les informations liées au produit et à garantir une

communication fluide entre elles (cf Fig. 3). Ces outils SI (*Système d'Information*) et logiciels constituent la base du PLM.

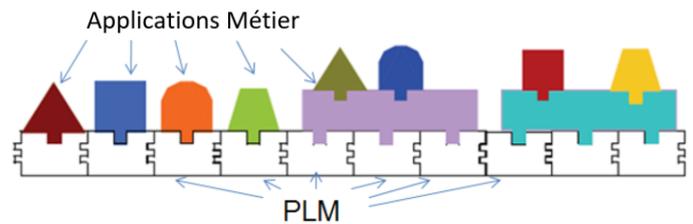


Figure 3: Illustration du principe de base d'un PLM [8]

Actuellement nous constatons que la liaison des données générées ou capitalisées par les différents SI, qui est le rôle fondamental d'un PLM, n'est pas efficace, voir n'existe pas. Par exemple, dans la chaîne de valeur des cartes électroniques [9], nous constatons que chaque contributeur ou acteur capitalise les données liées à sa valeur ajoutée apportée au produit dans un PLM propre de façon cloisonnée et inaccessible techniquement aux autres contributeurs.

Le modèle PLM en "racine carrée" vise à répondre à cette problématique en se basant sur trois éléments :

- **Engagement collaboratif** des différents acteurs,
- Mise en place d'**outils (hardware / software) ergonomiques** pour l'interaction avec les données relatives au cycle de vie des produits,
- Standardisation d'un **outil PLM commun** pour chaque acteur d'une chaîne de valeur industrielle.

B. IoT comme support au modèle "racine carrée"

L'"Internet of Things" (IoT) est "un réseau qui relie et combine les objets avec l'Internet, en suivant les protocoles qui assurent leur communication et leur échange d'informations à travers une variété de dispositifs." [10]. L'IoT peut ainsi se définir comme étant "un réseau de réseaux permettant - via des systèmes d'identification électroniques normalisés et unifiés et des dispositifs mobiles sans fil - d'identifier directement et sans ambiguïté des entités numériques et des objets physiques et ainsi, de pouvoir récupérer, stocker, transférer et traiter les données sans discontinuité entre les mondes physiques et virtuels." [11].

Une des technologies fondamentales en IoT est la RFID (*Radio-Frequency IDentification*) qui permet à des microsystèmes électroniques de transmettre leurs identifiants lisibles sans contact, à l'aide d'ondes radiofréquences. En utilisant des lecteurs RFID, il est alors possible d'identifier, de tracer et de superviser automatiquement tout objet auquel est attaché un tag RFID [12] [13].

Le WSN (*Wireless Sensor Network*) est également considéré comme technologie fondamentale de l'IoT, permettant de transmettre et de superviser des paramètres capturés par des capteurs intelligents interconnectés entre eux. Cette technologie est utilisée dans plusieurs domaines: supervision

¹ **CIM**: Computer Integrated Manufacturing.

environnementale, suivi de malades, supervision industrielle, supervision du trafic routier, ... [14]. Les systèmes RFID existent sous une catégorie qualifiée de passive. Ce type de système passif possède une autonomie "sans limite", mais il doit être dans le champ de rayonnement du lecteur pour être alimenté. Les WSN offrent plus de fonctions et une portée de communication plus importante mais doivent avoir une batterie embarquée ce qui implique une autonomie "limitée", ce qui est le cas également pour les systèmes RFID actifs. Les avancées technologiques du RFID et du WSN apportent des contributions significatives au développement de l'IoT. RFID et WSN

implémentation nécessite une interconnexion entre l'équipement industriel, le produit et les outils de PLM de l'usine. Par conséquent, les équipements industriels peuvent mémoriser les améliorations apportées aux processus grâce à la mémoire des puces RFID et la liaison avec le PLM. Cette approche permet - dans un premier temps - d'accélérer la vitesse d'apprentissage d'une usine et de la transformer ainsi en "usine apprenante" et - dans un deuxième temps - enrichir quotidiennement le PLM en racine carrée de la chaîne de valeur globale. Ainsi, nous soulignons le caractère fortement collaboratif du modèle proposé. Une gestion des droits d'accès

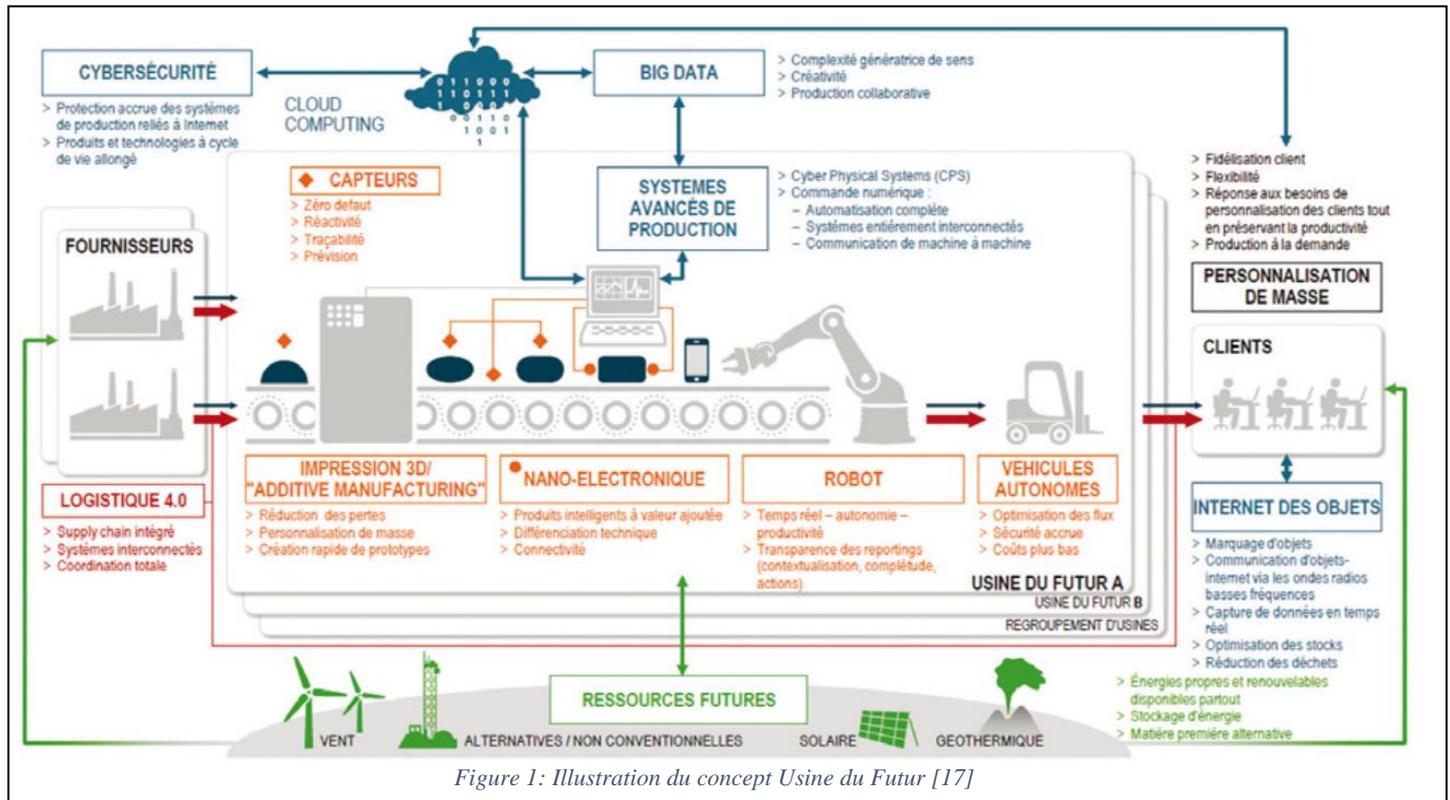


Figure 1: Illustration du concept Usine du Futur [17]

peuvent ainsi être intégrés ensemble pour une meilleure traçabilité en temps réel des objets et de leurs paramètres surveillés. Ceci permet alors de faciliter l'implémentation et le déploiement de certains services et applications industrielles.

L'IoT peut ainsi contenir plusieurs équipements électroniques, équipements mobiles et équipements industriels.

L'intérêt d'utiliser des objets connectés dans une chaîne de valeur industrielle consiste à disposer des paramètres que chaque acteur veut surveiller dans son usine. La fonctionnalité de base consiste à suivre en temps réel le cycle de production par des puces communicantes. Par la suite, les machines-outils de l'usine peuvent être configurées afin d'interagir avec les différents produits.

Cette instrumentation permet d'aller encore plus loin et de réduire significativement les taux d'erreurs de production. En effet, le produit portant son identifiant unique dispose de la possibilité de configurer les équipements industriels (*i.e.*: machine d'usinage, convoyeur, ...). La réussite de cette

aux données est alors primordiale afin ne pas divulguer de secret industriel.

IV. QUELQUES CHALLENGES TECHNIQUES

Comme illustré en Fig. 4, le modèle de PLM en "racine carrée" présenté dans ce papier s'adapte parfaitement aux besoins du concept d'"Usine du Futur". Ce concept - initié par l'industrie allemande en 2013 - est actuellement en plein émergence. Plusieurs applications industrielles basées sur ce concept ont été déployées mais un certain nombre de verrous techniques/challenges restent à résoudre.

Parmi ces challenges, nous pourrions citer :

- Concevoir un SOA pour une usine connectée, essentiellement par rapport à l'augmentation accrue des objets connectés dans une usine ou une chaîne de valeur donnée. Quand le nombre d'objets connectés est important, l'évolutivité constitue une problématique sur plusieurs niveaux incluant le transfert des données,

la mise en réseau, le traitement des données et la mise à disposition des différents services [18],

- D'un point de vue réseau, l'IoT est un réseau hétérogène compliqué, qui inclut des connexions entre différents types de réseaux, à travers des technologies de communication variées [18],
- Le développement exponentiel de l'univers IoT rend la standardisation des objets connectés de plus en plus compliquée. Une standardisation minutieuse couplée à un effort significatif de coordination est nécessaire pour permettre l'échange d'informations entre des équipements et des applications des pays différents [18],
- D'un point de vue services, le manque d'un langage commun de description des services rend le développement et l'intégration des ressources en services à valeur ajoutée plus compliqué. Les services développés pourraient être incompatibles avec différents environnements de communication ainsi que leur mise en œuvre [19].

V. CONCLUSION

Les chaînes industrielles - spécialement dans les domaines mécatroniques - évoluent et s'enrichissent tous les jours grâce à l'émergence de nouveaux produits plus complexes. La gestion des flux d'informations assurant une meilleure gestion du cycle de vie d'un produit industriel nécessite une production collaborative. L'implication des différents acteurs d'une chaîne de valeur constitue une brique primordiale à la mise en place du "*modèle en racine carrée*" proposé dans le présent article.

Comme concept technologique, l'IoT intègre plusieurs composants sensibles, capables d'identifier, d'analyser, de communiquer et d'être mis en réseau. L'association de ces technologies au modèle en racine carrée constitue un atout majeur pour un meilleur déploiement de ce dernier. A court terme, le modèle proposé est susceptible d'être déployé principalement comme modèle d'Ingénierie Système plus complet et collaboratif. Il doit permettre à la fois de tracer une feuille de route pour les concepteurs et fabricants d'un produit, puis permettre également de suivre le cycle de vie de ce produit jusqu'à sa phase de recyclage. A long terme, l'association d'une SOA à notre modèle permet d'imaginer un système informatique de type PLM commun entre tous les collaborateurs d'une même chaîne de valeur.

VI. REFERENCES

[1] I. Bouhaddou, A. Benabdelha. "Modèle PLM (Product Lifecycle Management) à base de systèmes multi-agents". Xème Conférence Internationale: Conception et Production Intégrées. Tanger, Maroc, décembre 2015.

- [2] H. Rakoto "Intégration du Retour d'Expérience dans les processus industriels". Institut National Polytechnique de Toulouse, pp. 11-21, octobre 2014.
- [3] T. Lojka, M. Bundzel, I. Zolotová "Industrial gateway for Data acquisition And remote control". Acta Electrotechnica et Informatica, Vol.15, No.2, 2015.
- [4] S.Terzi, , "Gestion du cycle de vie produits: Définitions, Problèmes ouverts et Modèles de référence". Thèse de Doctorat, Université de Nancy I, 2005.
- [5] J. Le Duigou, A. Bernard, J.C. Delplace, S. Gabriel, "Approche globale pour la structuration et la gestion de données techniques du cycle de vie produit: application a une famille de poulies d'accastillage". 7ème Conférence MOSIM'08, Paris, France, avril 2008.
- [6] CIMdata Inc. "Product Lifecycle Management "Empowering the future of business"". Tech. Rep, 2003.
- [7] J. Duigou "Cadre de modélisation pour les systèmes PLM en entreprise étendue application aux PME mécaniciennes". Thèse de doctorat, École Centrale de Nantes, Avril 2010.
- [8] Dutta, D., "Sustaining product innovation thru PLM". International Seminar on Product Lifecycle Management, Noida, India, mars 2005.
- [9] Y. Mehdi, "Conception, développement et commercialisation d'une solution clef en mains de traçabilité des cartes électroniques". Thèse professionnelle, ITECH, Lyon, France, octobre 2015.
- [10] M. Han and H. Zhang, "Business intelligence architecture based on internet of things" Journal of Theoretical & Applied Information Technology, Vol. 50, No. 1, pp. 90-95, 2013.
- [11] P.J. Benghozi, S. Bureau, F. Massit-Folléa, C. Waroquiers, S. Davidson, "L'internet des objets: quels enjeux pour l'Europe ?", Rapport de la chaire Orange "innovation and regulation", Ecole polytechnique et TELECOM Paris Tech., pp. 09-18, 2008.
- [12] L. Tan and N. Wang, "Future internet: The internet of things", in Proc.3rd Int. Conf. Adv. Comput. Theory Eng.(ICACTE), Chengdu, China, août 2010.
- [13] X. Jia, O. Feng, T. Fan, and Q. Lei, "RFID technology and its applications in internet of things (IoT)". in Proc. 2nd IEEE Int. Conf. Consum. Electron., Commun. Netw.(CECNet), Yichang, China, avril 2012.
- [14] L. Ren, L. Zhang, F. Tao, X. Zhang, Y. Luo, Y.Zhang, "A methodology towards virtualization-based high performance simulation platform sup-porting multidisciplinary design of complex products". Enterp. Inf. Syst., Vol. 6, No. 3, pp. 267-290, 2012.
- [15] Y. Mehdi, P. Serraféro, D. Navarro, M. Frachon, P.L.Jaeger, "Vers la rémanence des circuits imprimés électroniques: étude de cas de la solution CIRCOM". 11ème Colloque du GDR SoC-SiP, Nantes, France, juin 2016.
- [16] M.Blanchet, "Industrie 4.0: Nouvelle donne industrielle, nouveau modèle économique", Lignes de repères, pp. 22-29, N° ISBN: 9782366090314, avril 2016.

- [17] Gimelec, "Industrie 4.0: L'usine connectée", pp. 10-35, septembre 2013.
- [18] D. Miorandi, S. Sicari, F. De Pellegrini, I. Chlamtac, "Internet of things: Vision, applications and research challenges", *Ad Hoc Netw.*, Vol. 10, No. 7, pp. 1497-1512, 2012.
- [19] L. Atzori, A. Iera, and G. Morabito, "The internet of things: A survey", *Comput. Netw.*, Vol. 54, No. 15, pp. 2787-2805, 2010.