



**HAL**  
open science

## Technologies de l'industrie 4.0 applicables à la chasse aux gaspillages du lean manufacturing

Didérot Tadjia, Virginie Nadeau, Alexandre Mercier, Tony Wong

### ► To cite this version:

Didérot Tadjia, Virginie Nadeau, Alexandre Mercier, Tony Wong. Technologies de l'industrie 4.0 applicables à la chasse aux gaspillages du lean manufacturing. 18ème colloque national S.mart, Apr 2023, Carry le Rouet, France. hal-04043658

**HAL Id: hal-04043658**

**<https://hal.science/hal-04043658v1>**

Submitted on 23 Mar 2023

**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.

# Technologies de l'industrie 4.0 applicables à la chasse aux gaspillages du lean manufacturing

D. Tadjia <sup>a,\*</sup>, V. Nadeau <sup>b</sup>, A. Mercier <sup>c</sup>, T. Wong <sup>d</sup>

<sup>a</sup> Polytechnique Montréal, 2500 Chemin de Polytechnique, Montréal (Québec), H3T 1J4

<sup>b, c, d</sup> École de technologie supérieure, 1100 Rue Notre-Dame Ouest, Montréal (Québec), H3C 1K3

\* e-mail : diderot-deraillet.tadjia@polymtl.ca

## 1. INTRODUCTION

L'importance de la productivité, de la qualité et de la performance pour les entreprises manufacturières est bien connue dans la littérature [1]–[5] et dans la pratique, une entreprise qui n'affiche pas de bons résultats sur le plan de la productivité est condamnée à court, moyen ou long terme à la faillite. Le niveau de productivité d'une entreprise est le reflet de son état de santé. Celle-ci résulte de l'élimination des opérations sans valeur ajoutée soit, les sept types de gaspillage.

Le lean manufacturing ou production amincie est reconnu et largement accepté pour son efficacité dans l'élimination des gaspillages et donc l'amélioration de la productivité des entreprises [6]–[8]. Mais, bien que le lean manufacturing ait prouvé son efficacité pour la bonne conduite des opérations, sa mise en œuvre reste encore un défi pour plusieurs entreprises [9].

Tout comme le lean manufacturing, les technologies de l'industrie 4.0 sont présentées comme des facteurs clés pour améliorer la productivité, promouvoir la croissance économique et garantir la durabilité des entreprises manufacturières [10]. Ce que l'industrie 4.0 apporte concrètement aux systèmes de production se résume à l'accroissement des capacités de surveillance, de contrôle, d'optimisation et d'autonomie [11]. Par ailleurs l'industrie 4.0 connaît un engouement dans les milieux académiques et professionnels. Aujourd'hui, plus de 8 billions d'objets industriels sont connectés dans le monde et ils seront de 13.7 billions en 2025 [12]. Donc le passage à l'industrie 4.0 pour les entreprises manufacturières semble inévitable.

Le lean manufacturing et l'industrie 4.0 ont presque le même objectif soit améliorer sinon optimiser les performances opérationnelles des systèmes de production. En guise de tandem entre les deux approches, de récents travaux [13]–[15] ont renseigné que les pratiques techniques du lean manufacturing peuvent être

numérisées à l'aide des technologies de l'industrie 4.0 pour donner naissance au Kanaban 4.0, VSM 4.0, Just-in-time 4.0, etc. Cependant, en ce qui concerne la chasse aux gaspillages qui est l'épine dorsale du lean manufacturing, très peu d'écrits au meilleur de nos connaissances, présentent pratiquement l'utilisation des technologies de l'industrie 4.0 pour mener la chasse aux gaspillages. Certains auteurs [16]–[18] se limitent simplement à présenter les technologies de l'industrie 4.0 comme possibles moyens de chasse aux gaspillages sans exposer un cas concret.

Le travail exposé dans cet article est une preuve de concept qui vise à montrer qu'il est possible de mener la chasse aux gaspillages avec une solution pratique et simple basée sur les technologies de l'industrie 4.0.

Ce travail commence par les concepts généraux sur la chasse aux gaspillages du lean manufacturing et l'industrie 4.0 à la section 2. Ensuite, une synthèse des technologies de l'industrie 4.0 applicables à la chasse aux gaspillages est présentée à la section 3. Puis, un exemple de développement de solution utile à la chasse aux gaspillages de type temps d'attente est présenté à la section 4. L'article se termine par une discussion à la section 5 une conclusion à la section 6.

## 2. CONCEPTS GÉNÉRAUX

L'objectif de cette section est de présenter de façon sommaire les deux principaux concepts qui sont au centre de l'objet de ce travail à savoir les technologies de l'industrie 4.0 et les 7 gaspillages du lean manufacturing.

### 2.1. Principales technologies de l'industrie 4.0

Tout d'abord, il convient de rappeler que l'industrie 4.0 a été annoncée pour la première fois en 2011 à la foire industrielle de Hanovre en Allemagne pour marquer l'avènement de la 4<sup>ème</sup> révolution industrielle [19]. Mais

bien avant, en 1999, l'Internet des Objets avait déjà vu le jour avec les travaux sur la Radio Frequency Identification (RFID) au laboratoire Auto-ID du Massachusetts Institute of Technology (MIT) [20]. Ainsi, l'Internet des Objets peut être considéré comme précurseur de l'Industrie 4.0.

L'association allemande de télécommunication BITKOM révèle qu'il existe au moins 104 définitions différentes de l'industrie 4.0 [21]. De notre point de vue, on peut simplement percevoir l'industrie 4.0 comme un regroupement de plusieurs technologies numériques qui visent à améliorer sinon optimiser la conception, la fabrication et la distribution des produits manufacturiers.

Les technologies de l'industrie 4.0 ont en commun la donnée numérique. Comme dans l'industrie les informations et donc les données sont omniprésentes, l'industrie 4.0 trouve ainsi un très grand champ d'application. Chaque technologie a un domaine d'application bien spécifique cependant, il n'est pas exclu de les combiner pour résoudre des cas particuliers. Au regard du nombre de technologies numériques mentionnées dans la littérature, il peut être assez confus de dire quelle technologie appartient au groupe de l'industrie 4.0. Ainsi, le tableau 1 qui suit est une synthèse de quelques publications entre 2015 et 2020 qui résume l'essentiel des technologies de l'industrie 4.0 [22].

**Tableau 1 - Synthèse des groupes technologiques de l'industrie 4.0**  
Tiré de [22]

	I o T	C P S	C C	B D	C S	M A	R A	S S	M 2 M	I A	I H V	F A
Dombrowski (2017)	1	1		1		1			1			
CEFRIIO (2016)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
Gerbert (2015)	1		1	1	1	1	1	1			1	1
Shahin (2020)	1	1		1				1	1			
Pagliosa (2019)	1	1	1	1		1	1	1			1	1
Mayr (2018)			1	1		1	1	1		1		1
Wagner (2017)		1	1	1			1		1		1	
Rossini (2019)	1		1	1		1	1			1		1
Kamble (2020)	1		1	1		1	1					1

1= Le groupe technologique fait partie de l'industrie 4.0 selon l'auteur

Cette synthèse permet de constater que l'internet des objets (IoT), les systèmes cyber physiques (CPS), le cloud (CC), le big data (BD), les machines autonomes ou robots (MA), la réalité augmentée (RA), les systèmes de simulation (SS) et la fabrication additive (FA) sont les 8 principales technologies de l'industrie 4.0. En effet, la fréquence empirique de chacune d'elle est de plus de 50%.

Les autres groupes technologiques soit la cyber sécurité (CS), la communication machine to machine (M2M), l'intelligence artificielle (IA) puis l'intégration horizontale et verticale (IHV) trouvent indiscutablement des applications dans l'industrie ; ils ne sont simplement pas encore assez représentatifs pour être pris en compte lorsqu'on évoque les technologies de l'industrie 4.0.

## 2.2. Les 7 gaspillages du lean manufacturing

Le lean manufacturing est l'expression anglaise utilisée pour désigner la production amincie. En anglais, « lean » signifie maigre. Dans les entreprises « maigres », « dégraissées » et économiques, le « gras » renvoie aux opérations qui n'apportent pas de valeur ajoutée du point de vue du client [23]. L'origine du « gras » dans un système de production de biens est le gaspillage. Un gaspillage est tout sauf la quantité minimale d'équipements, matériaux, composants et temps de travail qui sont absolument essentiels à la production [6]. Traditionnellement, il existe 7 gaspillages qui peuvent se manifester pendant l'opération d'un système de production. Ceux-ci ont été identifiés et définis par [24]-[26].

Une synthèse de leurs définitions permet de présenter très pratiquement chacun des 7 gaspillages comme suit :

- Surproduction : Produire plus que ce qui est demandé ou avant que les clients n'en demandent.
- Temps d'attente : temps passé à ne rien faire dans l'attente de l'exécution d'une opération, d'un outil de travail, etc.
- Transport inutile : déplacement inutile des composants ou des matériaux pendant les opérations.
- Surtraitement : opérations de traitement supplémentaire, opérations qui permettent de fabriquer des produits de qualité supérieure que ce qui est demandé.
- Mouvement inutile : mouvent des personnes dans l'environnement de production sans contribution à la production.
- Défauts : fabrication des produits non conformes aux exigences du client.
- Surstockage : excès de matière première, produit fini ou produit en cours sur une période donnée.

À la vue de ces définitions, on peut raisonnablement penser que pour qu'une entreprise fonctionne à un rendement optimal, elle doit être complètement débarrassée de ces gaspillages. Le lean manufacturing est un système intégré de principes, pratiques, d'outils et de techniques qui peuvent être utilisés à cette fin [27].

## 3. TECHNOLOGIES DE L'INDUSTRIE 4.0 ET CHASSE AUX GASPILLAGES

Dans cette section, il est présenté les technologies de l'industrie 4.0 potentiellement utiles à la chasse aux gaspillages. Il est aussi présenté sommairement la façon dont certaines d'entre elles agissent sur chaque type de gaspillage.

### 3.1. Quelle(s) technologie(s) de l'industrie 4.0 pour chasser quel(s) gaspillage(s) ?

La chasse efficace aux gaspillages requiert les outils appropriés. Les technologies de l'industrie 4.0 sont à divers degrés applicables à cette fin. [16], [18], [28] ont effectué des travaux qui permettent comme le montre le tableau 2, d'établir une relation entre chaque type de gaspillage et les technologies qui peuvent être utilisées pour les identifier, les éliminer ou les éviter.

Tableau 2 - Relation entre les gaspillages et les solutions technologiques

	I o T	C P S	C C	B D	C S	M A	R A	S S	M 2 M	I A	I H V	F A
Surproduction	1	1		1								1
Temps d'attente	1	1	1	1								
Transport inutile	1			1		1					1	1
Surtraitements				1			1			1		1
Mouvement inutile				1		1		1				1
Défauts	1		1			1						
Surstockage	1		1					1				1

1= Le groupe technologique est applicable à la chasse du gaspillage correspondant selon les auteurs.

On peut remarquer à partir de ce tableau que l'IoT, le BD et la FA sont les principales technologies citées comme étant utiles à la chasse des gaspillages.

### 3.2. Modes d'action des technologies

Dans cette section, il est présenté succinctement l'utilisation possible des technologies de l'industrie 4.0 pour mener la chasse à chaque type de gaspillages.

- **Surproduction :** La surproduction peut être détectée et éliminée par une gestion efficace des flux de production. Dans cette optique, l'action de l'IoT est de collecter les données en temps réel sur les quantités produites et les CPS contribuent à une prise de décision rapide sur la planification de la production [18].
- **Temps d'attente :** L'intégration verticale et horizontale peut jouer un rôle clé dans la réduction des temps d'attentes en permettant aux différentes parties prenantes de recevoir un retour rapide d'information en situation de prise de décision [17]. Aussi, la connectivité des machines par le biais de l'IoT peut aboutir à une maintenance prédictive ce qui augmente la fiabilité des machines et donc diminue les temps d'arrêts qui sont en réalité des temps d'attente. Quant au BD, il a été montré par [29] que l'utilisation du BD peut diminuer les temps d'attente dans un procédé manufacturier.
- **Transport inutile :** Les applications du BD ont des retombées positives dans le domaine du transport en milieu manufacturier [30]. En effet, ces applications pourraient améliorer

l'identification et le diagnostic de l'itinéraire des véhicules, équipement et personnel [31], [32]. Ainsi, des itinéraires optimaux pourraient être définis pour les opérations récurrentes.

- **Surtraitements :** La visualisation des processus de production grâce aux des technologies de l'industrie 4.0 permet de cerner et éliminer les étapes inutiles effectuées pendant la production [33]. À cette fin, la connectivité offerte par l'IoT peut servir à relayer les informations et les instructions de travail pour éviter les erreurs dans le processus de production [31].
- **Mouvement inutile :** Les logiciels de simulation ont la capacité de réduire les mouvements inutiles [34] car les postes de travail et l'environnement manufacturier peuvent être conçus à partir des simulations. En conséquence, les mouvements inutiles seront diminués pendant les opérations.
- **Défauts :** L'utilisation de L'IoT a un impact avéré et clair sur l'identification des produits et composants défectueux aux différentes étapes de la production [35]. Cela permet de résoudre plus efficacement les problèmes de non-qualité.
- **Surstockage :** Une meilleure communication et connectivité dans la chaîne de valeur par le biais des technologies de l'industrie 4.0 permet d'obtenir les informations en temps réel sur les capacités des fournisseurs et la demande des clients permettant ainsi un meilleur contrôle des stocks [31]. Le CC en particulier garanti une meilleure prévision des demandes et des stocks par rapport aux logiciels classiques [17], [18].

## 4. EXEMPLE DE DEVELOPPEMENT D'UN SYSTEME D'IDENTIFICATION DE GASPILLAGE

Dans cette section, il est présenté un exemple de système de détection de gaspillage de type temps d'attente pouvant se manifester pendant l'opération d'un système de production.

### 4.1. Présentation sommaire du système

La fonction du système est de détecter la présence d'un objet physique et de déterminer l'intervalle de temps entre la détection de présence de deux objets successifs. Le système est composé d'une carte Raspberry Pi modèle 3b et d'une caméra Pi 5MP 1080P. Son architecture permet de dire qu'il s'agit d'un système IoT à deux couches. En effet, la caméra est la première couche et la carte Raspberry Pi étant la deuxième couche. La figure 1 ci-dessous montre un aperçu du système assemblé.



Figure 1 - Aperçu du prototype du système intégré

Pour reconnaître la présence d'objets, le système effectue la détection du niveau de gris des captures d'images avec seuillage paramétrable. Ensuite, il vérifie que les images modifiées des objets ont quatre contours et enfin que l'aire de chacune d'elles est comprise entre une valeur minimale et une valeur maximale. Quant à l'évaluation de l'intervalle de temps entre deux images d'objets, le système garde en mémoire les différents moments de capture d'image et traite ensuite cette information. L'intervalle de temps entre la présence de deux objets détectés correspond au temps d'attente qui s'est écoulé entre leurs passages devant la caméra.

Enfin, les informations sur la détection de présence d'objet et du temps d'attente sont inscrites dans un fichier CSV par le système.

#### 4.2. Tests de fonctionnement du système

Les tests effectués visent à valider l'aptitude du système à détecter la présence d'un objet physique et à évaluer l'intervalle de temps entre deux objets qui se suivent. L'objet utilisé est un « lego », soit une pièce de forme rectangulaire.

Pour valider la présence d'un objet, une centaine de captures d'image ont été effectuées avec et sans présence d'un objet. La réponse du système a été enregistrée pour chaque capture d'image. Pour tester le réalisme de la mesure de temps du système, deux tests ont été effectués. Le premier a consisté à laisser l'objet immobile face à la caméra pendant 10 secondes, l'enlever pendant 30 secondes et le remettre pendant 10 secondes. Le deuxième test s'est effectué en suivant les mêmes étapes cependant avec l'objet en mouvement.

#### 4.3. Résultats

La figure 2 montre les résultats des tests de détection de présence d'objet en éclairage normal soit l'éclairage du jour dans une pièce à aire ouverte.

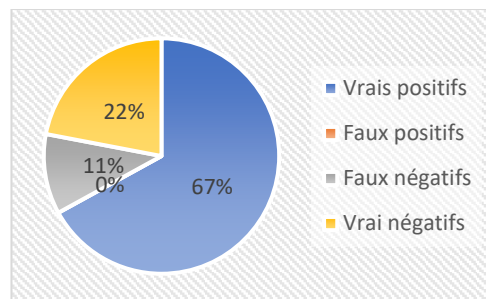


Figure 2 - Résultats du test de détection de présence d'un objet en éclairage normal

$$\text{Exactitude} = (TP+TN) / N = (67 + 22) / 100 = 89\%$$

$$\text{Précision} = TP / (TP+FP) = 67 / (67 + 0) = 100\%$$

Avec :

- TP : nombre de vrais positifs
- FP : nombre de faux positifs
- FN : nombre de faux négatif
- TN : nombre de vrai négatif
- N : nombre total de captures d'image

Le tableau 3 montre une comparaison entre les temps d'attente mesurés par le système et par un appareil de mesure indépendant.

Tableau 3 - Résultats des tests de mesure de temps d'attente

	Temps d'attente réel (S)	Temps d'attente mesuré (S)
Objet immobile	30	32.13
Objet en mouvement	30	33.59

## 5. DISCUSSION ET RECOMMANDATIONS

Les résultats des tests de fonctionnement du système indiquent qu'il est capable de renseigner la présence ou l'absence d'un objet presque 9 fois sur 10 avec une précision parfaite. Cependant, nous remarquons que l'information sur le temps d'attente a une erreur absolue de 2.13 secondes lorsque l'objet est immobile et de 3.59 secondes lorsqu'il est en mouvement. Nous pensons que les écarts des résultats de mesures du temps d'attente sont imputables à la qualité de la caméra utilisée. Celle-ci prend 1 à 2 secondes pour effectuer les captures d'image. C'est pourquoi nous recommandons de changer de caméra pour l'amélioration de ce résultat. Quant à l'exactitude qui est imparfaite, nous pensons que la position de la caméra par rapport à l'objet et l'intensité de la lumière du jour auraient eu un impact sur ce résultat. Ainsi, nous recommandons d'effectuer les tests dans un environnement lumineux mieux contrôlé et de fixer adéquatement la caméra par rapport à la façade de l'objet à filmer. Cela pourrait donner un meilleur résultat de l'exactitude.

Le système en l'état actuel ne peut qu'effectuer la détection et la reconnaissance des objets de forme rectangulaire. Nous recommandons d'implémenter une nouvelle stratégie soit l'apprentissage supervisé dans le système ce qui améliorerait la qualité de la détection et de la mesure du temps d'attente. En plus, avec l'apprentissage supervisé le système serait capable de reconnaître les objets de diverses formes.

En lieu et place du système présenté dans cet article pour la détection des temps d'attente, des systèmes beaucoup plus simples auraient pu être utilisés pour mesurer l'intervalle de temps entre deux objets consécutifs. À la différence des autres types de capteurs tels que les détecteurs de proximité, les cellules photoélectriques, etc., la caméra offre la possibilité de reconnaître la forme de l'objet en plus de renseigner sur sa présence. Donc le développement du système avec caméra a une extension possible vers des applications de contrôle de la qualité.

Pour que l'intervalle de temps mesuré par le système soit qualifié de gaspillage, il faut spécifier une limite de temps au-delà duquel il s'agit d'un gaspillage au sens du lean manufacturing. Dans un système de production réel, nous recommandons d'abord de bien déterminer l'emplacement de la caméra. Idéalement celui-ci doit être placé à la sortie des produits finis ou des en-cours de production. En plus il faut déterminer les seuils de qualification des temps d'attente à chaque emplacement des caméras pour une utilisation efficace du système.

## 6. CONCLUSION

Le but visé dans ce travail était de montrer qu'il est pratiquement possible de mener la chasse aux gaspillages du lean manufacturing au moyen des technologies de l'industrie 4.0. Pour cela, nous avons effectué un rappel de la définition des différents types de gaspillage, identifier les technologies de l'industrie 4.0 utiles à la chasse aux gaspillages puis développer et tester une preuve de concept applicable à la détection des temps d'attente. Ce travail permet aussi de montrer qu'il est possible de réconcilier le lean manufacturing et l'industrie 4.0 qui ont tous deux le même objectif. Pour les entreprises qui ont déjà implémenté le lean manufacturing, une approche en utilisant les systèmes semblables à celui qui a été présenté dans cet article peut les permettre d'effectuer un passage à l'industrie 4.0.

## REMERCIEMENTS

Nous remercions grandement le professeur Michel Tollenanere qui a jugé bon et utile de nous informer de la tenue de ce colloque et surtout pour nous avoir invités à y participer. Merci beaucoup Michel.

Nous remercions également Grenoble INP - Génie industriel pour avoir accepté de prendre en charge les frais associés à notre participation.

## RÉFÉRENCES

- [1] R. Mohanty, « Understanding the integrated linkage: Quality and productivity », *Total Quality Management & Business Excellence - TOTAL QUAL MANAG BUS EXCELL*, vol. 9, p. 753-765, déc. 1998, doi: 10.1080/0954412988226.
- [2] A. M. Belay, P. Helo, J. Takala, et F. Kasie, « Effects of quality management practices and concurrent engineering in business performance », *International Journal of Business and Management*, vol. 6, n° 3, p. 45-62, 2011, doi: 10.5539/ijbm.v6n3p45.
- [3] A. Alsughayir, « The impact of quality practices on productivity and profitability in the Saudi Arabian dried date industry », *American Journal of Business and Management*, vol. 2, p. 340-346, 2013, doi: 10.11634/216796061302465.
- [4] B. Crouzet, D. Parker, et R. Pathak, « Preparing for productivity intervention initiatives », *International Journal of Productivity and Performance Management*, vol. 63, n° 7, p. 946-954, sept. 2014, doi: 10.1108/IJPPM-10-2013-0175.
- [5] A. Prakash, S. K. Jha, K. D. Prasad, et A. K. Singh, « Productivity, quality and business performance: an empirical study », *International Journal of Productivity and Performance Management*, vol. 66, n° 1, p. 78-91, janv. 2017, doi: 10.1108/IJPPM-03-2015-0041.
- [6] S. Taj et C. Morosan, « The impact of lean operations on the Chinese manufacturing performance », *Journal of Manufacturing Technology Management*, vol. 22, n° 2, p. 223-240, 2011, doi: 10.1108/17410381111102234.
- [7] M. Dora, M. Kumar, D. V. Goubergen, A. Molnar, et X. Gellynck, « Operational performance and critical success factors of lean manufacturing in European food processing SMEs », *Trends in Food Science & Technology*, vol. 31, p. 156-164, 2013, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2013.03.002>.
- [8] J. A. Garza-Reyes, V. Kumar, S. Chaikittisilp, et K. H. Tan, « The effect of lean methods and tools on the environmental performance of manufacturing organisations », *International Journal of Production Economics*, vol. 200, p. 170-180, juin 2018, doi: 10.1016/j.ijpe.2018.03.030.
- [9] A. Pearce, D. Pons, et T. Neitzert, « Implementing lean - Outcomes from SME case studies », *Operations Research Perspectives*, vol. 5, p. 94-104, 2018, doi: 10.1016/j.orp.2018.02.002.
- [10] F. Rosin, P. Forget, S. Lamouri, et R. Pellerin, « Impacts of Industry 4.0 technologies on Lean principles », *International Journal of Production Research*, vol. 58, n° 6, p. 1644-1661, mars 2020, doi: 10.1080/00207543.2019.1672902.
- [11] CEFRIO, « Prendre part à la révolution manufacturière? Du rattrapage technologique à l'Industrie 4.0 chez les PME ». CEFRIO, 2016.
- [12] Statista Research Department, « Internet des objets : nombre d'appareils connectés dans le monde 2015-2025 », *Statistica*, 2016. <https://fr.statista.com/statistiques/584481/internet-des-objets-nombre-d-appareils-connectes-dans-le-monde--2020/>
- [13] M. Rossini, F. Costa, G. L. Tortorella, et A. Portioli-Staudacher, « The interrelation between Industry 4.0 and lean production: an empirical study on European manufacturers », *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 102, n° 9, p. 3963-3976, juin 2019, doi: 10.1007/s00170-019-03441-7.
- [14] S. Kamble, A. Gunasekaran, et N. C. Dhone, « Industry 4.0 and lean manufacturing practices for sustainable organisational performance in Indian manufacturing companies », *International Journal of Production Research*, vol. 58, n° 5, p. 1319-1337, mars 2020, doi: 10.1080/00207543.2019.1630772.
- [15] G. L. Tortorella et D. Fettermann, « Implementation of Industry 4.0 and lean production in Brazilian manufacturing companies », *International Journal of Production Research*, vol. 56, n° 8, p. 2975-2987, avr. 2018, doi: 10.1080/00207543.2017.1391420.
- [16] F. D. Cifone, K. Hoberg, M. Holweg, et A. P. Staudacher, « 'Lean 4.0': How can digital technologies support lean practices? », *International Journal of Production Economics*, vol. 241, p. 108258, nov. 2021, doi: 10.1016/j.ijpe.2021.108258.
- [17] Yeen Gavin Lai, K. Hoong Wong, D. Halim, J. Lu, et H. Siang Kang, « Industry 4.0 enhanced lean manufacturing », in *2019 8th International Conference on Industrial Technology and Management (ICITM)*, mars 2019, p. 206-211. doi: 10.1109/ICITM.2019.8710669.

- [18] S. Rajab, M. Afy-Shararah, et K. Salonitis, « Using Industry 4.0 capabilities for identifying and eliminating lean wastes », *Procedia CIRP*, vol. 107, p. 21-27, mai 2022, doi: 10.1016/j.procir.2022.04.004.
- [19] R. Drath et A. Horch, « Industrie 4.0: Hit or hype? [Industry Forum] », *Industrial Electronics Magazine, IEEE*, vol. 8, p. 56-58, juin 2014, doi: 10.1109/MIE.2014.2312079.
- [20] Massachusetts Institute of Technology, « MIT auto-ID laboratory », 2020. <https://autoid.mit.edu/>
- [21] T. Bidet-Mayer, *L'industrie du futur: une compétition mondiale*. Paris: Presses des Mines, 2016.
- [22] D. Tadjia, S. Bassetto, T. Wong, et M. Tollenaere, « Les objets connectés pour améliorer la culture de la production épurée : revue de littérature et esquisse de solution applicable aux entreprises manufacturières », vol. 21-24, n° 1, p. 1-35, 2021, doi: 10.21494/ISTE.OP.2021.0745.
- [23] E. L. Zajkowska, « Contribution à l'implantation de la méthode Lean Six Sigma dans les Petites et Moyennes Entreprises pour l'amélioration des processus », École centrale de Lille, 2013. [En ligne]. Disponible sur: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00795533/document>
- [24] T. Ohno, *Toyota Production System: Beyond large-scale production*. New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 1988.
- [25] S. Shingo, *A study of the Toyota Production System from an industrial engineering Viewpoint*. Portland: Productivity Press, 1989.
- [26] J. Liker, *The Toyota way: 14 management principles from the world's greatest manufacturer*. New york: McGraw-Hill Education, 2004.
- [27] R. Čiarnienė et M. Vienažindienė, « An empirical study of lean concept manifestation », *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 207, p. 225-233, oct. 2015, doi: 10.1016/j.sbspro.2015.10.091.
- [28] D. Singh, J. Bhamu, J. Bhadu, et P. Kumar, « Integration between Lean, Six Sigma and Industry 4.0 technologies », *International Journal of Six Sigma and Competitive Advantage*, vol. 13, juin 2021, doi: 10.1504/IJSSCA.2021.120224.
- [29] D. Kho, S. Lee, et R. Zhong, « Big Data Analytics for Processing Time Analysis in an IoT-enabled manufacturing Shop Floor », *Procedia Manufacturing*, vol. 26, p. 1411-1420, janv. 2018, doi: 10.1016/j.promfg.2018.07.107.
- [30] T. C. Edwin Cheng, S. S. Kamble, A. Belhadi, N. O. Ndubisi, K. Lai, et M. G. Kharat, « Linkages between big data analytics, circular economy, sustainable supply chain flexibility, and sustainable performance in manufacturing firms », *International Journal of Production Research*, vol. 60, n° 22, p. 6908-6922, nov. 2022, doi: 10.1080/00207543.2021.1906971.
- [31] J. Posada *et al.*, « Visual Computing as a Key Enabling Technology for Industrie 4.0 and Industrial Internet », *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 35, p. 26-40, mars 2015, doi: 10.1109/MCG.2015.45.
- [32] S. Wang, J. Wan, D. Li, et C. Zhang, « Implementing Smart Factory of Industrie 4.0: An Outlook », *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 2016, p. 1-10, janv. 2016, doi: 10.1155/2016/3159805.
- [33] F. Shrouf, J. Ordieres-Meré, et G. Miragliotta, « Smart factories in industry 4.0: a review of the concept and of energy management approached in production based on the Internet of things paradigm. », p. 697-701, déc. 2014.
- [34] T. Coors *et al.*, « Simulation assisted process chain design for the manufacturing of bulk hybrid shafts with tailored properties », *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 108, juin 2020, doi: 10.1007/s00170-020-05532-2.
- [35] L. S. Valamede et A. C. Santos Akkari, « Lean Manufacturing and Industry 4.0: A Holistic Integration Perspective in the Industrial Context », in *2020 9th International Conference on Industrial Technology and Management (ICITM)*, févr. 2020, p. 63-68. doi: 10.1109/ICITM48982.2020.9080393.