

L'introduction de l'IoT et la reconfiguration de la fiabilité du système de production industrielle

Rostand, Affogbolo

IAE, Université de Nantes

rostand.affogbolo@univ-nantes.fr

Claire, Gauzente

IAE, Université de Nantes

claire.gauzente@univ-nantes.fr

Pascale, Kuntz

Polytech, Université de Nantes

pascale.kuntz@univ-nantes.fr

Résumé :

La littérature en management des opérations et de la production suggère que l'acquisition d'un avantage concurrentiel pour une entreprise industrielle est fondée sur le manufacturing strategy (MS). S'appuyant sur quatre leviers socles que sont la qualité, la fiabilité, la flexibilité et l'efficacité du coût, le MS décline la philosophie et la stratégie de l'entreprise industrielle en capacités opérationnelles. Toutefois, parmi les quatre leviers qui fondent le MS, la fiabilité, définie comme l'aptitude à minimiser la probabilité d'une défaillance, semble être la moins étudiée en dehors du management des opérations et de la production. Par ailleurs, sa conceptualisation est souvent partielle. Cette communication a en conséquence pour but de proposer une conceptualisation plus complète de cet élément socle du MS. L'article montre aussi, à partir de l'étude des cas de deux entreprises industrielles de produit, comment l'internet des objets (IoT) peut être mobilisé pour reconfigurer la fiabilité du système de production des entreprises industrielles et plus généralement pour améliorer leur performance. Les premières observations semblent indiquer que l'IoT est prioritairement utilisé pour reconfigurer les processus de deux dimensions de la fiabilité du système de production : l'automatisation et la gestion des stocks. L'article discute enfin les implications de ces observations en management stratégique et en management des opérations.

Mots-clés : Fiabilité, Système de production, Manufacturing strategy, IoT, Performance

L'introduction de l'IoT et la reconfiguration de la fiabilité du système de production industrielle

INTRODUCTION

La littérature en management des opérations et de la production souligne que l'acquisition d'un avantage concurrentiel dans le contexte industriel passe par la mise en place des capacités opérationnelles du manufacturing strategy (MS). Considéré par Wheelwright (1984) comme une traduction fonctionnelle de la philosophie et de la stratégie d'entreprise, au même titre que le marketing ou la finance, le MS soutient à travers un ensemble cohérent de choix et de compromis opérationnels l'objectif stratégique de la recherche de l'avantage concurrentiel. A notre connaissance, les travaux de Skinner (1966, 1974) sont les premiers à conceptualiser le MS comme fondement de la recherche de l'avantage concurrentiel. Ils aspiraient à expliciter la contribution de la fonction « opérations industrielles » à la performance concurrentielle de l'entreprise. Depuis ces premières publications, quatre principales capacités opérationnelles socles du MS ont été mises en évidence (Wheelwright, 1984 ; Größler & Grübner, 2006) : l'efficacité du coût (de production), la qualité, la fiabilité et la flexibilité. Plusieurs tentatives de compléments ont été ensuite proposées. Ces quatre capacités restent cependant les plus mobilisées dans la littérature académique, même la plus récente, à l'instar de Größler & Grübner (2006), Chavez et al. (2017), Moeuf et al. (2018). Toutefois, la qualité et la flexibilité¹ ont bénéficié d'une large attention dans différentes disciplines comme les systèmes d'information (par ex. Nelson & Ghods, 1998 ; Thatcher & Pingry, 2004), le contrôle de gestion (par ex. Abernethy & Lillis, 1995 ; Ittner & Larcker, 1997), le marketing (par ex. Guo, 2006 ; Mitra & Golder, 2006), le management stratégique (par ex. Powel, 1995 ; Sanchez, 1995). En revanche, la fiabilité semble être moins explicitée. Elle a surtout été étudiée en management des opérations et de la production où sa conceptualisation est souvent partielle quand elle n'est pas réduite à l'objectif opérationnel du respect ou de l'amélioration du lead time (délai de fabrication). Définie comme l'aptitude à limiter le risque de défaillance, la fiabilité du système de production d'une usine ne se limite pas seulement à la maintenance des machines et équipements industriels pour améliorer leur disponibilité (voir par ex.

¹ Pour l'efficacité du coût, Ferdows & De Meyer (1990) suggèrent qu'elle résulte du cumul de la qualité, de la fiabilité et de la flexibilité.

Zakarian & Kusiak, 1999 ; Brokanz et al., 2017). Son acception doit être plus large, la production industrielle étant un système combinant de nombreuses opérations présentant des niveaux de criticité variable. Et, en sus de ces aspects techniques, la fiabilité du système de production doit aussi intégrer une dimension sociale en sollicitant les connaissances et expériences disponibles chez les opérateurs.

La mobilisation de ces différentes dimensions constitue un problème délicat mais le développement de l'internet des objets (IoT) ouvre de nouvelles perspectives opérationnelles qui sont de plus en plus prises en compte par les entreprises industrielles. Les données process que rend disponibles l'IoT permettent aujourd'hui d'optimiser la planification de la maintenance (Feng & Shanthikumar, 2018) ou de renforcer l'expertise des opérateurs et de décentraliser la prise de certaines décisions (Moeuf et al., 2018). Il en résulte une amélioration de la performance opérationnelle et plus généralement de la performance économique. L'introduction de l'IoT dans les opérations de l'entreprise industrielle peut par ailleurs être assimilée à une capacité dynamique. Elle vise la reconfiguration de la fiabilité qui est une capacité opérationnelle pour délivrer une performance plus élevée. Cette étude examine alors la question suivante : comment l'entreprise industrielle reconfigure-t-elle la fiabilité de son système de production grâce à l'IoT pour améliorer sa performance opérationnelle et concurrentielle ? Pour y répondre, nous analysons les cas de deux entreprises industrielles de produit² pour expliciter les reconfigurations qu'elles ont mises en œuvre au niveau de leurs processus industriels pour en améliorer la fiabilité et obtenir une performance plus élevée. Ce faisant, l'étude propose deux ordres de contributions, théoriques et managériales. Au plan théorique, elle propose une conceptualisation plus complète que les travaux précédents sur la fiabilité du système de production industrielle. Ces travaux ont examiné plusieurs combinaisons de dimensions mais à notre connaissance ils se limitent au maximum à trois. Bouslah et al. (2018) ont par exemple analysé la combinaison production – qualité – maintenance. Cependant, ni la qualité, ni la planification de la production ne constituent des dimensions formelles de la fiabilité. Ferdows & De Meyer (1990) expliquent en outre que l'amélioration de la qualité contribue à l'amélioration de la fiabilité. Dans le sillage de Bouslah et al. (2018), Kumar et al. (2018) présentent de nombreux travaux combinant deux (production – maintenance, gestion des stocks – maintenance, etc.) ou trois variables

² Entreprises industrielles fabricant à l'unité suivant des processus d'assemblage de pièces. Exemple des industries automobiles, aéronautiques, machinerie.

(production – gestion des stocks – maintenance) du système de production. A notre connaissance, notre approche conceptuelle est la première à intégrer quatre dimensions : l’automatisation, la gestion des stocks, la maintenance, la supervision. L’article propose également un complément à la littérature sur le MS, une théorie explicitant la contribution des opérations industrielles à la performance concurrentielle dans un environnement changeant (Skinner, 1996 ; Brumme et al., 2015). Au plan managérial, l’étude éclaire sur les pratiques et usages que font les entreprises de l’IoT pour reconfigurer la fiabilité de leur système de production industrielle.

La suite de l’article est organisée de manière suivante. La section 1 présente les éléments théoriques mobilisés. Dans la section 2 est brièvement exposée la méthodologie de l’étude de cas. La section 3 illustre les pratiques et usages observés dans les deux entreprises industrielles étudiées. Enfin la section 4 discute les implications découlant des observations faites.

1. APPROCHE CONCEPTUELLE

La proposition conceptuelle de l’étude combine l’IoT avec les dimensions de la fiabilité du système de production industrielle pour délivrer une performance plus élevée. Dans la suite, nous examinons donc l’introduction de l’IoT dans les opérations industrielles. Nous explicitons ensuite les quatre dimensions de la fiabilité considérées. Nous montrons comment la reconfiguration de ces dimensions peut contribuer à l’amélioration de la performance. Mais avant, nous effectuons un bref rappel sur les capacités dynamiques pour montrer que l’introduction de l’IoT est une capacité dynamique visant à faire évoluer les capacités opérationnelles du MS dont la fiabilité.

1.1. LES CAPACITES DYNAMIQUES

Définies comme l’aptitude de l’entreprise à innover, à s’adapter au changement ou à initier un changement qui soit favorable aux clients tout en étant défavorable aux concurrents (Teece et al., 2016), les capacités dynamiques sont un cadre théorique classique de la littérature en sciences de gestion. Il examine les processus d’acquisition d’un avantage concurrentiel durable par l’entreprise dans un contexte d’hypercompétition (Teece, 2014). Les capacités dynamiques analysent les sources ainsi que les méthodes de création et de capture de la valeur par les entreprises opérant dans des environnements hyperconcurrentiels, soumis à des

changements, technologiques, rapides et importants (Teece et al., 1997). Toutefois, les capacités dynamiques n'interviennent pas que dans les contextes de changements importants, mais aussi lorsque la structure du marché et l'environnement sont plus stables, ne changeant que modérément (Eisenhardt & Martin, 2000 ; Zollo & Winter, 2002). Les capacités dynamiques correspondent donc aux routines stratégiques et organisationnelles, aux processus mobilisés pour intégrer, reconfigurer, acquérir, dégager des ressources afin de répondre aux changements, importants ou modérés, de l'environnement et pour créer un avantage concurrentiel. Teece et al. (1997) rappellent cependant que la notion de capacités dynamiques souligne le rôle clé de la direction stratégique de l'entreprise dans l'adaptation, la reconfiguration, l'intégration appropriée des compétences internes et externes pour répondre aux changements de l'environnement. Adner & Helfat (2003) introduisent alors le terme de capacités managériales dynamiques. La littérature en management stratégique distingue dans ce cadre les capacités opérationnelles des capacités dynamiques. Les capacités opérationnelles permettent à l'entreprise d'opérer ses activités au quotidien en utilisant plus ou moins les mêmes ressources et méthodes, à la même échelle, pour soutenir les produits et services actuels adressant les mêmes segments de clientèle (Winter, 2003). Ce sont des capacités ordinaires, statiques, qui servent à maintenir le statu quo (Helfat & Winter, 2011). En revanche, les capacités dynamiques visent à modifier la manière dont l'entreprise opère au quotidien. Elles permettent de créer et de modifier les stocks de ressources, les processus, les routines. Les capacités dynamiques agissent ainsi sur les capacités opérationnelles (Winter, 2003 ; Zollo & Winter, 2002), sur les ressources et processus exploités ou même sur la structure du marché et de l'écosystème en initiant de nouveaux business models (Teece, 2007).

Plusieurs formes de capacités dynamiques peuvent être distinguées : le développement de produit, la prise de décision stratégique, l'alliance stratégique, l'acquisition d'entreprise, l'intégration d'une nouvelle activité, l'introduction d'une nouvelle technologie, etc. (Eisenhardt & Martin, 2000 ; Helfat et al., 2007 ; Teece, 2007 ; Zollo & Winter, 2002). L'introduction de l'IoT dans les activités de l'entreprise est en conséquence assimilable à une capacité dynamique. En contexte industriel, elle vise particulièrement à reconfigurer les ressources et les capacités opérationnelles du MS dans l'objectif de la recherche de l'avantage concurrentiel.

1.2. L'INTRODUCTION DE L'IOT DANS LES OPERATIONS INDUSTRIELLES

Le principe fondamental de l'IoT allie connectivité réseau et collecte de données pour répondre à des besoins de flexibilité et d'agilité (voir Brock, 2001 ; Want, 2010 ; Akhtar et al., 2018). L'usage classique de l'IoT en contexte industriel consiste à recourir à des capteurs (natifs aux équipements ou installés en supplément) connectés au réseau internet industriel (filaire ou non) pour collecter des données qui seront stockées en local (au sein de l'usine) ou à distance (dans un cloud). Ces données sont ensuite traitées et analysées avec des solutions logicielles qui fournissent des résultats sous la forme d'indicateurs qui sont transmis à d'autres plateformes logicielles de gestion opérationnelle pour servir de base au pilotage de l'activité et à la prise de décisions, en temps réel au besoin, concernant la planification de la production, la qualité, la maintenance, l'approvisionnement, la gestion des ressources humaines, etc. Des extensions de ce schéma se développent aujourd'hui via de nouveaux artefacts technologiques (ex : casques connectés pour la réalité virtuelle ou la réalité augmentée). Mais quels que soient les supports, l'IoT offre aux entreprises de nouvelles opportunités pour innover et créer de la valeur (Santoro et al., 2018). Il est assimilable aux advanced manufacturing technologies (AMT) (Szalavetz, 2018) qui représentent le sous-ensemble industriel des technologies IT (Dean & Snell, 1996). Comme les AMT, l'IoT vise à permettre aux entreprises industrielles de répondre aux changements survenant dans l'environnement comme les demandes de plus en plus importantes des clients en termes de personnalisation (Zammuto & O'Connor, 1992 ; Fatorachian & Kazemi, 2018), l'entrée de nouveaux concurrents sur le marché et la compression des prix (Brumme et al., 2015). Toutefois, l'IoT semble pouvoir compléter les systèmes AMT classiques (ERP, PLM, EDI, etc.) en offrant davantage de flexibilité et d'agilité au système de production industrielle. Il ouvre la voie aux systèmes reconfigurables (Fatorachian & Kazemi, 2018) en permettant notamment de reconfigurer plus facilement et à moindre coût la planification de la fabrication, parfois à distance, pour répondre à de nouvelles demandes émanant des clients. Il permet aussi d'accéder en temps réel à diverses données (Hwang et al., 2017) concernant par exemple l'arrêt non sollicité du fonctionnement d'une machine. La disponibilité de ces données facilite l'identification des sources du problème et la remise en marche de l'équipement. Ce qui améliore le taux de disponibilité des équipements et de l'ensemble du système de production. L'introduction de l'IoT, et des AMT en général, dans les opérations industrielles ne s'effectue toutefois pas sans risques. On peut notamment identifier le risque de complexification du système, les risques technologiques, les risques organisationnels et les risques de marché. En

effet, l'introduction de l'IoT accroît le niveau de complexité et d'interdépendance des processus industriels. Ce qui peut être source de paralysie du système à la suite d'une erreur humaine ou d'un problème technique (Zammuto & O'Connor, 1992). Un tel niveau de complexité requiert en conséquence des compétences techniques plus élevées de la part des opérateurs et assimilés³. L'introduction de l'IoT peut potentiellement aussi être source de risque technologique (inadéquation de la solution technologique déployée), de risque marché (la demande se contracte par exemple de façon durable, ce qui mettrait en péril le retour sur investissement), de risque organisationnel (résistance au changement au sein de l'entreprise) (Hottenstein & Dean, 1992). Plusieurs approches ont été répertoriées (Zammuto & O'Connor, 1992) pour gérer les incertitudes managériales et organisationnelles résultant de ces risques potentiels. Elles se situent dans un continuum allant d'une approche orientée contrôle comme première extrémité à une approche orientée flexibilité à l'autre extrémité, la différence fondamentale entre ces extrêmes portant sur la localisation de l'expertise et l'accès à l'information. L'approche orientée contrôle confère l'expertise et l'accès aux données exclusivement aux niveaux hiérarchiques élevés et aux fonctions support pour garder le contrôle, la maîtrise du système et la prise de décision à ces niveaux. A l'inverse, l'approche orientée flexibilité fait des niveaux hiérarchiques inférieurs le cœur du système pour compartimenter les problèmes potentiels et leur résolution en rendant davantage experts les opérateurs et assimilés et en leur donnant accès à l'information. Dans une telle configuration, les opérateurs et assimilés montent en compétence, prennent des décisions. La résolution d'un problème opérationnel s'effectue en conséquence à l'endroit où il survient, l'opérateur étant compétent pour décider et mettre en œuvre. Cette deuxième approche est davantage cohérente avec la logique de l'IoT évoquée précédemment. Cependant, certaines entreprises peuvent opter pour des approches mixtes combinant les bénéfices des deux options. L'introduction de l'IoT dans le cadre de cette étude se décline ainsi en trois modalités : introduction orientée contrôle, introduction orientée opérateurs, option mixte.

1.3. LA FIABILITE DES OPERATIONS INDUSTRIELLES

Constituant un levier socle du MS pour rechercher un avantage concurrentiel, la fiabilité est l'aptitude à minimiser la probabilité d'une défaillance. Elle concerne deux niveaux essentiels, le produit et le système de production. Selon Wheelwright (1984), un produit livré au client

³ Les chargés de la maintenance, les caristes, etc.

peut être qualifié de fiable quand il fonctionne comme attendu. La fiabilité du produit peut toutefois être étendue au système après-vente. Wheelwright (1984) indique par exemple que l'entreprise doit être en mesure de mobiliser les ressources nécessaires pour corriger dans les meilleurs délais toute défaillance pouvant survenir au cours de l'utilisation par le client. L'IoT permet d'aller encore plus loin pour prévenir l'éventualité de la défaillance. Certaines entreprises intègrent à leurs produits des capteurs leur permettant de surveiller en continu plusieurs paramètres de fonctionnement en contexte réel d'utilisation quotidienne par le client acquéreur du produit. Un tel système vise à alerter le client d'une potentielle malfonction à corriger avant qu'elle n'entraîne une défaillance, une incapacité du produit à fonctionner comme attendu.

Dans cette étude, nous nous focalisons sur le système de production dont la fiabilité s'évalue à la capacité à délivrer le produit fini selon les termes convenus (fonctionnalité, quantité, délai) avec le client. La moindre défaillance à quelque étape que ce soit dans l'enchaînement des processus depuis la réception des approvisionnements externes jusqu'à la livraison des produits finis peut compromettre le respect des termes convenus. Quatre aspects majeurs méritent en conséquence d'être pris en compte par l'entreprise : le facteur humain, la gestion des stocks, le bon fonctionnement du système, et l'intégrité des machines. Nous occultons volontairement la logistique externe (arrivée et départ) bien qu'elle puisse aussi être sujette à d'éventuelles défaillances pouvant compromettre le respect des termes convenus avec les clients. Il existe des solutions IoT pouvant contribuer à réduire le risque de défaillance de la logistique externe. Mais ces aspects s'étendent à d'autres parties prenantes de la chaîne de valeur (fournisseurs, transporteurs, distributeurs) qui sortent de l'objectif de cette étude focalisée sur les processus opérationnels internes à l'entreprise. Notre propos dans la suite se limitera donc à la présentation des dimensions de la fiabilité des processus industriels internes.

1.3.1. L'automatisation pour minimiser la défaillance humaine

Le facteur humain est une dimension essentielle de la performance des processus opérationnels (de Leeuw & van den Berg, 2011). Il peut en revanche aussi être source de défaillance des processus et du système, une défaillance qui peut se révéler coûteuse (Kern & Refflinghaus, 2013, 2015). L'entreprise industrielle a en conséquence besoin de s'assurer de la fiabilité humaine, une notion suggérée dans la littérature pour désigner la recherche de la minimisation de la défaillance humaine. Assimilée à l'erreur humaine, notamment pour les

processus qui requièrent une part d'intervention manuelle, la défaillance humaine a trois types de causes (Kern & Refflinghaus, 2015) : la complexité de la tâche, l'ergonomie de l'environnement de travail (agencement de l'espace de travail, mise à disposition des équipements pertinents, etc.), et la performance individuelle (qui sollicite l'expérience, les émotions et la condition physique). Pour minimiser le risque de défaillance pouvant résulter de ces trois types de sources, l'entreprise peut faire le choix de l'automatisation des processus qui consiste à mobiliser des solutions mécaniques ou IT pour opérer et contrôler les processus et ainsi réduire la participation et la charge de travail de l'humain (Säfsten et al., 2007). Le niveau d'automatisation peut varier selon la nature de l'industrie. Säfsten et al. (2007) expliquent par exemple que les industries de process⁴ peuvent prétendre à une automatisation quasi-complète de la chaîne de fabrication, contrairement aux industries de produit où la chaîne de fabrication est souvent semi-automatisée avec une combinaison d'opérations automatiques effectuées par des artefacts (par exemple des robots industriels) et de tâches manuelles effectuées par les opérateurs. Deux formes d'automatisation sont mises en évidence dans la littérature : (i) l'automatisation mécanique qui consiste à réduire la charge de travail physique des opérateurs, à limiter à l'essentiel leur participation physique à la réalisation des processus, et (ii) l'automatisation cognitive qui vise à réduire la charge cognitive des opérateurs par le recours à des solutions IT leur mettant à disposition les informations pertinentes pour la réalisation des tâches (Choe et al., 2015). L'automatisation cognitive, encore appelée automatisation support (Säfsten et al., 2007), facilite la prise de décision et améliore la fiabilité de l'opérateur.

La mobilisation de l'IoT permet la mise en place de ces deux types d'automatisation suggérés dans la littérature. Pour l'automatisation mécanique, les processus de fabrication peuvent intégrer des robots connectés rendant compte en temps réel de l'exécution des tâches qu'ils exécutent. Des engins autonomes de logistique interne (AGV⁵) peuvent aussi être sollicités pour assurer des tâches de déplacement de produits, de matières premières à divers endroits de l'usine. Ces engins réduisent de façon importante les risques de collision au sein de l'usine, une potentielle source de ralentissement de la cadence de production. L'automatisation cognitive se fonde pour sa part sur les données process transmises par divers capteurs installés sur la ligne de fabrication (Feng & Shanthikumar, 2018).

⁴ Entreprises industrielles fabricant souvent par lots ou par séries via des processus de mélange de matières premières. Exemples des industries de la chimie, de l'agroalimentaire, de l'énergie.

⁵ Automatic Guided Vehicle

1.3.2. La gestion des stocks

La gestion des stocks et des approvisionnements, qui affecte l'ajustement marché du système de production (Bozarth & McDermott, 1998) via le respect des termes contractuels convenus avec les clients, est une autre dimension importante de la fiabilité qui peut impacter la performance opérationnelle et économique. Gong et al. (2014) démontrent par exemple qu'une meilleure fiabilité des approvisionnements participe à améliorer la satisfaction des clients. Un défaut de livraison ou une erreur dans la livraison des matières premières représente en effet une potentielle source de défaillance du système de production. A partir de la littérature, Cannon (2008) identifie plusieurs moyens de prévenir ou limiter le risque de défaillance des approvisionnements : un meilleur système de prévision tenant compte des fluctuations de la demande, des solutions IT plus avancées (AMT), la mise en place d'une meilleure collaboration avec les fournisseurs de matières premières critiques, l'optimisation de la logistique. Des AMT de type IoT permettent de répondre à ces différents besoins. La RFID offre notamment la possibilité d'améliorer la visibilité en temps réel de l'état des stocks (Sarac et al., 2010 ; Ben-Daya et al., 2017). Couplée avec des plateformes de traitement des données, elle peut permettre d'automatiser les opérations de commande aux fournisseurs en tenant compte de la demande de produits à fabriquer et de réduire par conséquent les erreurs portant sur la référence à commander ou sur la quantité. De plus, l'usage d'AGV pour acheminer des produits d'un endroit à l'autre au sein de l'usine contribue à optimiser la logistique interne. Cependant, l'éventualité d'une erreur dans l'approvisionnement et la gestion des stocks ne concerne pas que les approvisionnements externes. Le picking (opération consistant à identifier la position des matières premières ou produits au sein de l'entrepôt pour les collecter et les acheminer vers les lignes de fabrication ou les clients) peut également être sujet à des erreurs pouvant ralentir la cadence de production. L'amélioration de la localisation des produits au sein de l'entrepôt grâce à l'IoT permet de limiter ce type d'erreur et de réduire par ailleurs le temps mis par l'opérateur pour effectuer cette tâche.

La gestion des stocks et des approvisionnements représente aussi une source de coût que l'entreprise souhaite minimiser (Cannon, 2008). La littérature suggère à cet effet la mise en place de pratiques de type JIT (just-in-time) et lean manufacturing. De nombreux travaux ont mis en évidence une relation positive entre la mise en place du JIT et la réduction des coûts liés aux stocks. Cependant, Capkun et al. (2009) montrent en cohérence avec de précédents travaux (Balakrishnan et al., 1996 ; Lieberman et al., 1999) que les pratiques visant à minimiser les coûts de gestion des stocks sont davantage efficaces pour les stocks d'en-cours

de fabrication que pour les stocks de matières premières et produits finis. Les opérations liées aux stocks d'en-cours de fabrication nécessitent moins une coordination avec les fournisseurs et clients. Leur amélioration résulte surtout de la reconfiguration de processus opérationnels internes (Capkun et al., 2009). Pour les coûts liés aux stocks de matières et produits finis, Cannon (2008) souligne que leur réduction se fonde davantage sur une meilleure collaboration avec les fournisseurs et clients et sur la disponibilité de l'information y afférente. Mais, que ce soit pour les en-cours de fabrication ou pour les matières premières et produits finis, l'objectif pour l'entreprise est donc d'identifier, en se fondant sur l'information disponible, les reconfigurations possibles en interne ou en termes de collaboration avec les fournisseurs et clients pour parvenir à réduire les coûts liés aux stocks. Cela se traduit entre autres par l'optimisation ou minimisation, voire la suppression, des stocks tampons (Kumar et al., 2018) destinés à prémunir l'entreprise contre les aléas externes (défauts de livraison par exemple) et internes (indisponibilité d'une machine par exemple).

1.3.3. La maintenance pour garantir la disponibilité des machines

La troisième dimension de la fiabilité du système de production porte sur la maintenance des outils de production afin de garantir leur disponibilité maximale. Trois principales formes de maintenance sont mobilisées par les entreprises industrielles (Van Horenbeek et al., 2013) : la maintenance corrective, la maintenance préventive, et la maintenance prédictive. La maintenance corrective intervient à la suite d'une panne et vise à remettre en état de marche l'équipement (Van Horenbeek et al., 2013). La maintenance préventive vise à réduire la probabilité d'une immobilisation de la machine en raison d'une panne. Elle peut être planifiée en fonction de critères d'utilisation comme la durée de fonctionnement, le nombre de rotations moteur, etc. Sa planification et sa mise en œuvre tiennent principalement compte des recommandations du fournisseur de l'équipement, recommandations transcrites en prescriptions et connaissances codifiées et diffusées au sein de l'entreprise. Dans un tel cas, la maintenance préventive est qualifiée de systématique (Gouriveau et al., 2013). La planification de la maintenance préventive peut aussi se fonder sur l'expérience des opérateurs qui peuvent estimer le moment pertinent de sa réalisation. Les opérateurs peuvent déceler à partir de leur expérience les signes avant-coureurs d'une prochaine panne qu'il est possible d'éviter en déclenchant une opération de maintenance. Cette forme de maintenance préventive peut être qualifiée de fiabiliste. Toutefois, le fonctionnement de la machine varie en fonction de la tâche en cours. Selon les références de produits qu'elle est amenée à

fabriquer, les niveaux d'effort déployé, d'énergie consommée et d'usure sur la machine varient (Feng & Shanthikumar, 2018). Ce qui peut rendre non précise la planification systématique de la maintenance en fonction des critères d'utilisation, ou encore la méthode fiabiliste fondée sur l'expérience. Une troisième forme, plus prédictive, est recommandée pour optimiser la planification de la maintenance car elle tient compte de l'évolution réelle des paramètres de fonctionnement ainsi que de la planification de la production. Basée sur l'exploitation des données (niveaux de température, de vibration, etc.) transmises par les capteurs, la maintenance prédictive vise la détection d'anomalies de fonctionnement préfigurant d'une défaillance à venir (Gouriveau et al., 2013 ; Van Horenbeek et al., 2013). Elle permet à l'entreprise de limiter le risque d'indisponibilité de la machine et de minimiser le coût des opérations de maintenance. Selon des estimations de McKinsey, la maintenance prédictive réduit de 30 à 50% la durée d'indisponibilité des machines industrielles dont elle améliore par ailleurs la durée de vie de 20 à 40% (Bokrantz et al., 2017 ; Feng & Shanthikumar, 2018). Deux types de maintenance prédictive peuvent être distingués : la maintenance conditionnelle qui ne permet pas d'identifier avec certitude la date d'occurrence d'une défaillance à venir (Gouriveau et al., 2013), et la maintenance prévisionnelle qui extrapole l'analyse des paramètres actuels de fonctionnement et de dégradation de la machine pour pronostiquer son temps de fonctionnement avant que ne survienne la panne (Gouriveau et al., 2013). En tout état de cause, la maintenance prédictive fait l'objet d'une attention croissante de la part des praticiens (Bokrantz et al., 2017 ; Feng & Shanthikumar, 2018) pour deux raisons majeures : une meilleure efficacité opérationnelle et économique par rapport à la maintenance systématique ou fiabiliste, et la possibilité qu'offre l'IoT de mettre en place une surveillance machine permettant d'accéder en temps réel aux paramètres de fonctionnement.

1.3.4. La supervision pour s'assurer du bon fonctionnement du système

La supervision vise à surveiller en temps réel et en continu le fonctionnement des équipements et le bon enchaînement des divers processus. Elle permet de détecter d'éventuelles dérives et d'initier les actions correctives pertinentes. Moeuf et al. (2018) expliquent notamment que la supervision du système de production par le biais des capteurs connectés permet la mise en place d'un système d'alertes pour signaler les dérives des machines, les dérives de la cadence de production, les niveaux critiques d'usure de pièces, etc. La supervision, grâce à l'IoT, vise aussi à rendre davantage agile et flexible le pilotage des opérations. Dans une approche zéro papier, la mise en place de la supervision permet de

collecter de manière automatique et non plus manuelle les données et de délivrer les informations pertinentes pour suivre en temps réel les niveaux de production. Combinée avec l'automatisation cognitive ou support, elle assure le reporting de l'information simultanément vers plusieurs niveaux hiérarchiques au sein de l'usine. Dans le cas d'une introduction IoT orientée opérateurs, cela a l'avantage de décentraliser plusieurs décisions opérationnelles et de faciliter la prise d'initiatives des collaborateurs des niveaux hiérarchiques inférieurs (Moeuf et al., 2018) dont l'expertise est davantage reconnue et renforcée. La littérature suggère deux principales formes de supervision du système de production (Wang & Chan, 2012) : la supervision centrée sur la machine qui vise à surveiller le fonctionnement d'une seule machine, la plus critique par exemple, dont l'indisponibilité prolongée perturbe l'ensemble du système de production, et la supervision globale qui porte en revanche sur l'ensemble des étapes et processus du système de production dont elle vise à surveiller le bon déroulement.

L'analyse ci-dessus nous permet de proposer une opérationnalisation de la fiabilité du système de production industrielle avec les modalités des quatre dimensions présentées (voir tableau 1).

Tableau 1. Présentation du texte à l'intérieur d'un tableau

| Dimensions | Modalités | Explicitations |
|--------------------|----------------|---|
| Automatisation | Mécanique | Réduire la charge physique pour l'opérateur pour limiter l'erreur humaine |
| | Cognitive | Réduire la charge cognitive pour l'opérateur pour limiter l'erreur humaine |
| Gestion des stocks | Stabilité | Améliorer la visibilité des stocks pour limiter les erreurs dans les commandes adressées aux fournisseurs |
| | Picking | Améliorer le processus de collecte en entrepôt pour réduire le lead time |
| | Stocks tampons | Minimiser les stocks tampons et leurs coûts |
| Maintenance | Corrective | Remettre au plus vite la machine en état de marche à la suite d'une panne |
| | Systématique | Planifier les processus de maintenance en fonction de critères d'utilisation |
| | Fiabiliste | Planifier les processus de maintenance à partir de l'expérience des opérateurs |
| | Conditionnelle | Planifier les processus de maintenance à partir des données machine ; la date d'occurrence de la panne ne peut cependant pas être identifiée avec précision |
| Supervision | Prévisionnelle | Planifier les processus de maintenance à partir des données machine ; la date d'occurrence de la panne peut être identifiée avec davantage de précision |
| | Machine | Mettre en place la collecte continue de données sur le fonctionnement d'une machine critique |
| | Système | Mettre en place la collecte continue de données sur le fonctionnement d'un ensemble de machines interdépendantes |

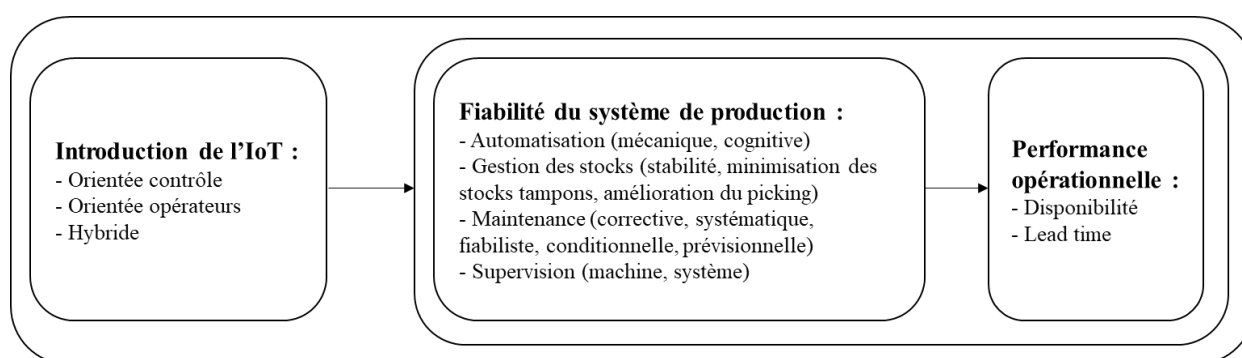
1.4. L'IMPACT SUR LA PERFORMANCE

La mise en place des reconfigurations de processus évoquées ci-dessus pour renforcer la fiabilité du système de production industrielle grâce à l'IoT vise à améliorer la performance opérationnelle qui est un objectif permanent pour les entreprises industrielles, notamment

dans les pays d'Europe de l'Ouest ou d'Amérique du Nord où le coût de la main-d'œuvre est plus élevé. La littérature en management des opérations s'en fait l'écho en y dédiant une grande partie des travaux publiés. L'un des principaux indicateurs de performance que mobilise cette littérature est le délai de fabrication ou lead time. Il estime le temps qui s'écoule à partir du moment où les matières premières sont réceptionnées jusqu'à la finalisation de la fabrication des produits. Il est parfois étendu à la mise du produit fini à la disposition du client. Réduire le lead time, en réduisant les durées (temps de cycle) des nombreux processus qui s'enchaînent pour former le système de production, ressort ainsi comme l'une des premières formes d'amélioration de la performance opérationnelle (Capkun et al., 2009).

Dans le cas particulier de l'étude de la fiabilité des opérations industrielles, l'indicateur de performance le plus mobilisé est la disponibilité de la machine ou du système selon le niveau d'analyse choisi. Dans le cadre de notre étude, nous retenons les deux indicateurs, disponibilité et lead time, qui interviennent en complémentarité dans l'amélioration de la fiabilité du système de production. L'amélioration de ces indicateurs de performance opérationnelle aboutit plus généralement à l'amélioration de la satisfaction des clients (Gong et al., 2014) et à l'amélioration de la performance concurrentielle de l'entreprise. La figure 1 propose la représentation schématique des différents éléments de notre approche conceptuelle.

Figure 1. Proposition conceptuelle



Nous présentons dans la suite l'approche empirique de l'article, les premières observations en termes de reconfigurations mises en place par les entreprises ainsi que les implications qui en découlent.

2. APPROCHE EMPIRIQUE

L'approche empirique développée dans cet article s'appuie sur une approche par étude de cas, qui comme l'ont rappelé Benbasat et al. (1987) permet d'extraire de la connaissance fondée sur les pratiques et les expériences des entreprises. Les technologies de l'information, caractérisées par des innovations et évolutions permanentes, constituent un champ fertile pour la démarche par étude de cas, une approche également pertinente pour analyser des phénomènes encore peu explorés dans la littérature et pour faire émerger de nouvelles théories (Benbasat et al., 1987). Dans sa mise en œuvre, l'étude de cas peut explorer les pratiques d'une entreprise unique ou celles de plusieurs entreprises (Eisenhardt, 1989) en ouvrant alors sur une analyse croisée, holistique, utile au caractère généralisable de la connaissance extraite (Rymaszewska et al., 2017).

Dans le cadre de cet article, nous avons analysé les cas de deux entreprises industrielles de produit. La première, baptisée EIA est un constructeur automobile français de premier plan. La seconde, baptisée EIB, est un groupe allemand proposant plusieurs types de produits. Il est organisé en divisions qui correspondent à ses différents marchés industriels. Notre étude porte sur son activité d'équipementier automobile, intégrée à la division mobilité. Le choix de ces deux entreprises résulte d'un processus de sélection ciblée combinant deux aspects : (i) l'accès à de la documentation publique suffisante sur leurs usages de l'IoT, et (ii) la possibilité d'interviewer de manière approfondie aux moins deux managers de chaque entreprise.

2.1. BREVE PRESENTATION DES ENTREPRISES

Ayant établi des accords de confidentialité avec les entreprises étudiées, nous n'en ferons qu'une description partielle mais suffisante pour notre analyse.

EIA est une entreprise historique du paysage industriel français. Elle a réalisé en 2017 un chiffre d'affaires de plus de 50 milliards d'euros. Il y a une dizaine d'années, elle a lancé un plan visant à améliorer la performance opérationnelle de ses usines pour renforcer sa compétitivité. Elle a notamment ciblé la réduction des coûts de production (assemblage de véhicules, de moteurs, de boîtes de vitesse) et des coûts fixes (taxes foncières, frais d'assurance pour les locaux industriels, etc.) au niveau des usines tout en s'ouvrant à davantage de flexibilité pour répondre à la variation de la demande client. Elle a dans cette optique progressivement testé et intégré à ses opérations industrielles diverses technologies

comme l'éthernet industriel, la RFID, la réalité virtuelle, la réalité augmentée et les AGV pour améliorer la fiabilité de ses opérations. L'intégration de ces technologies s'est particulièrement accélérée ces dernières années où parfois de nouvelles lignes de fabrication entièrement connectées sont installées. Il est à noter qu'à l'échelle de l'entreprise toutes les technologies évoquées ne sont pas introduites de façon uniforme dans les usines. Le recours à une solution technologique est souvent fonction de besoins identifiés en termes d'amélioration de processus. Dans le cadre de notre étude, nous avons analysé les pratiques au niveau d'une usine faisant partie d'un cluster de trois sites industriels basés en France et dirigé par un seul directeur régional. Cette usine, dédiée à l'assemblage de voitures, a été profondément réaménagée il y a quelques années. Grâce à l'introduction de solutions connectées, la longueur de la principale ligne d'assemblage a par exemple été raccourcie.

EIB est également un groupe industriel historique. Basé en Allemagne, il a de nombreuses usines dans le monde dont quelques-unes en France. Toutes divisions confondues, son chiffre d'affaires 2017 s'élève à plus de 70 milliards d'euros. L'introduction progressive de technologies connectées (RFID, smartphones et tablettes pour les opérateurs, AGV, etc.) par EIB au sein de ses usines remonte à une dizaine d'années, avec la mise en œuvre d'un plan industrie 4.0. Là aussi, l'introduction est faite en fonction de besoins opérationnels identifiés. Dans le cadre de notre étude, nous avons analysé les pratiques opérationnelles d'une usine basée en France où l'IoT est largement exploité.

2.2. COLLECTE DE DONNEES ET ANALYSE

L'étude de cas peut combiner de multiples méthodes de collecte de données, en l'occurrence les archives documentaires, les interviews, les observations in situ, et le questionnaire (Eisenhardt, 1989). Cela permet de trianguler les sources pour renforcer la justification des construits et hypothèses (Eisenhardt, 1989). Pour l'analyse, deux approches complémentaires sont mobilisables, notamment lorsque l'étude porte sur plusieurs cas (Eisenhardt, 1989) : d'abord une analyse en profondeur de chaque cas qui peut prendre la forme d'une description narrative des observations et du contexte, ensuite une analyse croisée s'appuyant sur les thématiques ou éléments théoriques émergeant de la littérature ou sélectionnés sur la base des connaissances du chercheur. Suivant ces préconisations, la collecte des données de l'étude a été organisée en deux phases : une phase de collecte documentaire et une phase de collecte par interviews semi-structurées.

Au cours de la première phase, nous avons exploité les sources documentaires (articles de presse, communiqués de presse, rapports d'organismes professionnels) accessibles via les moteurs de recherche de Google et Europresse et directement sur les sites des entreprises étudiées. Ces éléments nous ont permis d'une part d'obtenir des premières informations sur les usages opérationnels de l'IoT par les entreprises, et d'autre part d'identifier les interlocuteurs à contacter pour les interviews. Plusieurs managers de EIA et EIB ont ainsi été contactés par mail et, après au moins une relance, deux managers de chacune des entreprises ont pu être interrogés, sur la base d'un guide d'entretien (Annexe A). La première partie du guide d'entretien porte sur la connaissance de l'entreprise et de son intérêt pour les technologies IoT. La seconde partie se focalise sur les pratiques et usages opérationnels au sein des unités industrielles et les gains de performance observés. Les interviews ont été enregistrées et intégralement retranscrites. L'analyse a ensuite été effectuée de façon manuelle sur les textes bruts, sans codage préalable. En suivant les suggestions d'Eisenhardt (189), nous avons analysé les contenus des interviews en nous référant aux éléments théoriques présentés dans notre proposition conceptuelle.

Tableau 2. Interviews menées

| | EIA | EIB |
|----------------------|---|---|
| Managers interviewés | 1- Vice-président innovation & qualité 2- Responsable IT & industrie 4.0 du cluster d'usines | 1- DSI & Chief data officer France 2- Responsable industrie 4.0 de l'usine |
| Durées cumulées | 2h20 | 3h30 |

A noter que les deux phases de collecte ont été conduites entre Septembre et Décembre 2018. Le tableau 2 présente les managers interrogés chez EIA et EIB.

3. PREMIERES OBSERVATIONS

Nous analysons dans un premier temps les deux cas de façon dissociée. Nous croisons ensuite les observations.

3.1. INTRODUCTION DE L'IOT ET RECONFIGURATION DE LA FIABILITE CHEZ EIA

L'introduction de l'IoT chez EIA répond à deux objectifs économiques : (i) baisser les coûts au sein de son parc industriel en France où le coût de la main-d'œuvre est par exemple plus élevé qu'en Europe centrale ou de l'Est où il opère également des usines et (ii) répondre plus

efficacement au besoin de personnalisation se traduisant par une variété plus importante (les options commandées) dans l'assemblage des voitures.

Le traitement d'un nombre plus élevé de variétés sur les lignes d'assemblage avait généré une complexification plus élevée et un risque d'erreur plus important pour l'opérateur. L'usage des diverses solutions IoT a minimisé ce risque d'erreur et a par ailleurs amélioré l'ergonomie du poste de travail pour l'opérateur : il n'y a plus de pièces directement stockées en bord de ligne, il y a moins de risque de chute de pièce pouvant causer un accident de travail. Pour les middle managers comme le chef d'équipe, cela a amélioré le contrôle visuel qu'ils peuvent effectuer sur le travail des opérateurs. L'absence de stock de pièces en bord de ligne permet en effet au chef d'équipe de voir plus loin au niveau de son atelier et de remarquer plus vite si un opérateur rencontre des difficultés, par exemple sur le temps de cycle d'une tâche. Nous parlerons donc ici d'une approche d'introduction hybride orientée middle managers et opérateurs.

Pour les dimensions de la fiabilité du système de production, les reconfigurations de processus mises en place grâce à l'IoT se présentent comme suit :

- Automatisation : EIA a mis en place une automatisation mécanique avec des AGV connectés en WiFi et qui communiquent en temps réel leur position et leur état de fonctionnement. Ces engins autonomes assurent l'acheminement des kits de pièces entre l'entrepôt et le bord de la ligne d'assemblage. Sur cette tâche, les AGV ont remplacé les caristes⁶ et garantissent un taux d'interruption plus faible en réduisant à presque nulles les collisions éventuelles avec d'autres équipements au sein de l'usine.
- Gestion des stocks : EIA a fait évoluer ses processus de gestion et suivi des stocks en mettant en place un système connecté de kitting pour assister l'opérateur chargé du picking. Le système allume successivement des voyants pour indiquer à l'opérateur les rangées où il faut récupérer les pièces selon les quantités demandées et selon un ordre précis pour constituer le kit qui sera ensuite acheminé par l'AGV vers le bord de la ligne d'assemblage. A noter qu'un kit correspond aux demandes personnalisées d'un client. Le système de kitting automatise par ailleurs l'inventaire des stocks de pièces. Cette reconfiguration du processus de collecte des pièces est basée sur le principe de l'automatisation cognitive en déchargeant l'opérateur à la collecte de la tâche préalable de la recherche de la localisation précise des

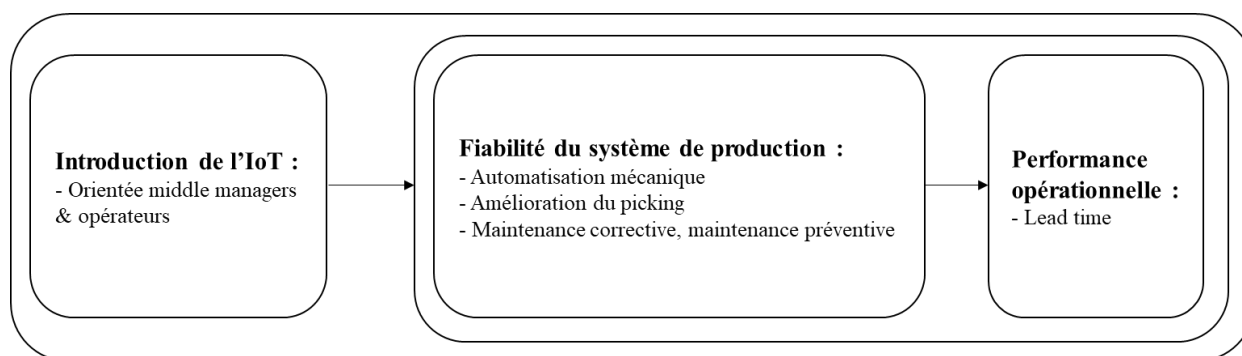
⁶ Opérateurs chargés de conduire les engins motorisés de logistique comme les chariots

pièces. Le risque d'erreur dans la sélection des pièces et dans l'ordre de constitution du kit devient plus faible et l'opérateur réalise la tâche en moins de temps que par le passé.

- Supervision : les machines de l'usine d'EIA étudiée étant d'un âge moyen élevé, elles n'ont pas nativement des capteurs. Selon l'importance attribuée à la machine dans le système de production, l'entreprise lui ajoute des capteurs, mais seulement pour dénombrer la tâche accomplie. Les données d'état de fonctionnement ne sont pas transmises. Ce qui implique un système de maintenance seulement correctif et préventif.

Les reconfigurations de processus mises en place au sein de cette usine d'EIA visent, en termes de performance opérationnelle, à respecter les temps de cycle à chaque étape et donc du lead time en bout de chaîne. Au plan concurrentiel, elles permettent au constructeur automobile de tenir les délais sur lesquels il s'est engagé auprès de ses clients pour obtenir leurs commandes, notamment pour les clients BtoB renouvelant périodiquement leurs flottes de voitures (par acquisition définitive ou selon le mode de la location longue durée, généralement à l'année). La figure 2 résume les pratiques notées au sein de l'usine étudiée chez EIA. Il faut noter que nous n'avons relevé aucune reconfiguration de processus au niveau de la dimension de maintenance.

Figure 2. Approche d'introduction de l'IoT et dimensions de la fiabilité chez EIA



3.2. INTRODUCTION DE L'IOI ET RECONFIGURATION DE LA FIABILITE CHEZ EIB

Chez EIB, l'introduction de l'IoT dans les opérations industrielles s'effectue suivant cinq axes du plan industrie 4.0 : obtenir des recommandations d'actions générées par les équipements et machines, améliorer la visibilité des flux de matières sur les sites industriels, optimiser la consommation d'énergie des bâtiments, faciliter le travail et la prise de décision pour les salariés, surveiller certains paramètres de fonctionnement des produits en contexte d'utilisation chez le client. La stratégie industrielle globale de l'entreprise évolue en

conséquence pour intégrer ces divers aspects centrés sur la disponibilité de la donnée et de l'information. Au niveau de l'usine étudiée, les initiatives IoT sont aussi mises en place en cohérence avec ces divers axes. Toutefois, en se fondant sur notre proposition conceptuelle, l'approche d'introduction observée peut être qualifiée d'hybride orientée middle managers et opérateurs. Comme nous l'explique le responsable industrie 4.0 de l'usine, le but principal de l'usage de solutions ou technologies IoT est de décharger les middle managers (chefs d'équipes, chefs d'ateliers, responsable fabrication, etc.) de la tâche de la compilation et du croisement manuels (via le tableur Excel) des données et de l'information. Il y a quelques années (quatre à cinq ans), cette tâche occupait l'essentiel de leur temps de travail. L'introduction de l'IoT visait donc à supprimer cette partie non essentielle qu'est la collecte manuelle de la donnée pour planifier les opérations en atelier. Les décisions opérationnelles sont prises plus rapidement. Pour les opérateurs, le principal apport de l'IoT s'estime en termes de niveau d'information auquel ils ont accès. L'ensemble capteurs – données – plateforme de traitement leur permet de mieux suivre l'évolution de la fabrication. L'accès à l'information étant plus étendu, l'expertise s'est davantage aussi décentralisée, permettant un traitement des problèmes au plus près du point où ils surviennent. Par ailleurs, il est moins requis la validation du niveau hiérarchique supérieur pour prendre une décision ou initier une action corrective.

Au niveau des dimensions de la fiabilité du système de production, les reconfigurations de processus mises en place par EIB grâce à l'IoT se présentent comme suit :

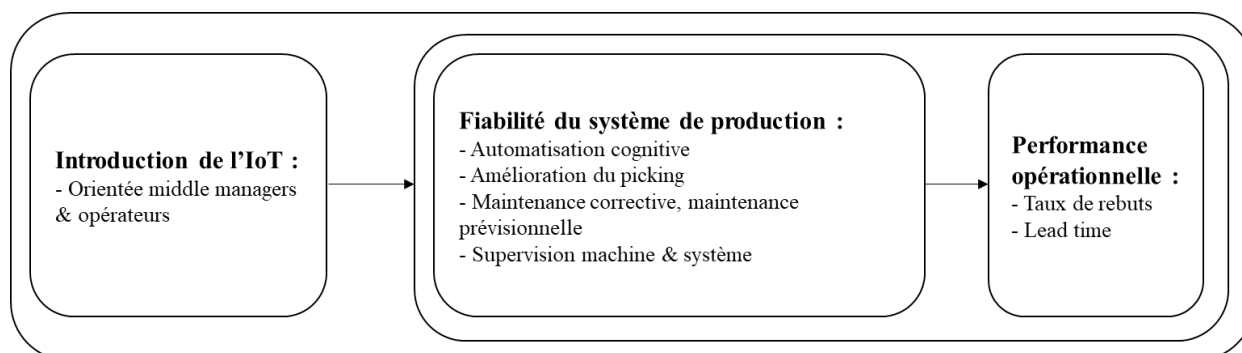
- Automatisation : comme décrit ci-dessus, EIB a reconfiguré ses processus pour mobiliser davantage d'automatisation cognitive tant au bénéfice des middle managers que des opérateurs afin de dégager des gains de temps et de réduire les erreurs.
- Gestion des stocks : au sein de cette usine d'EIB, la RFID est utilisée pour améliorer la visibilité des flux de matières et automatiser les inventaires. Les opérateurs chargés du picking sont également équipés de tablettes connectés au WiFi industriel pour réceptionner les demandes de matières de la part de la fabrication.
- Maintenance : au sein de l'usine étudiée chez EIB, le déclenchement de la maintenance corrective des machines s'effectue désormais à l'aide de la réalité augmentée. L'application de réalité augmentée est installée sur le smartphone dont est équipé l'opérateur à la fabrication. En scannant un QR code sur la machine, l'opérateur lance le processus de maintenance avec une alerte transmise à un autre opérateur chargé de la maintenance. En parallèle, l'opérateur à la fabrication accède à la documentation concernant la machine via

l'application, vérifie la disponibilité de pièce de rechange en fonction de la panne qu'il a renseignée sur l'application. Selon la complexité de la panne, la personne chargée de la maintenance peut proposer une assistance à distance ou se déplacer sur la machine pour effectuer la réparation. EIB mobilise aussi la maintenance prévisionnelle, avec une plateforme logicielle qui récupère et analyse les données machine pour transmettre des alertes aux opérateurs (fabrication, maintenance) et à leurs managers en cas de dérive. La plateforme logicielle planifie la maintenance en fonction du délai critique au terme duquel pourrait survenir un arrêt machine non sollicité.

- Supervision : pour la supervision, EIB a mis en place grâce aux données transmises par les capteurs un système de comparaison entre machines de mêmes types, de mêmes âges et effectuant les mêmes tâches (fabrication de la même référence de produit), quelles que soient leurs localisations géographiques dans le monde. Le but est de comprendre les écarts de performance entre machines et entre usines afin d'améliorer la performance de celles qui sous-performent, ce qui contribue à rendre plus fiable le système de production de chaque usine.

Combinées, les reconfigurations de processus mises en place par EIB grâce à l'IoT contribuent à réduire le taux de rebuts et à améliorer les temps de cycle au niveau de chaque atelier, et donc du lead time en bout de chaîne. Ces éléments permettent en plus à EIB en tant qu'équipementier de tenir les délais courts sur lesquels il s'engage auprès des constructeurs automobiles mais aussi de s'ajuster en fonction des fluctuations de la demande sur le marché de l'automobile. La figure 3 propose un résumé schématique des pratiques notées au sein de l'usine d'EIB.

Figure 3. Approche d'introduction de l'IoT et dimensions de la fiabilité chez EIB



3.3. ANALYSE CROISEE DES RECONFIGURATIONS MISES EN PLACE CHEZ EIA ET EIB

Croisées, les pratiques observées au sein des deux entreprises industrielles que nous avons étudiées mettent en évidence une approche hybride similaire en termes d'introduction de l'IoT dans leurs processus de production. Elles fondent toutes deux leurs usages sur la nécessité de répondre aux exigences d'agilité et de flexibilité en termes d'ajustement externe pour répondre aux changements dans l'environnement, par exemple l'évolution des exigences des clients. L'aspect contrôle dans le cadre de l'introduction de l'IoT est néanmoins considéré différemment d'une entreprise à l'autre : il semble davantage présent chez EIA où le recours aux solutions IoT a permis aux chefs d'équipes d'améliorer leur capacité de contrôle visuel des tâches des opérateurs.

Au niveau de la reconfiguration de la fiabilité du système de production, les deux entreprises industrielles mettent l'accent sur la minimisation des risques d'erreurs humaines via l'automatisation. Chez EIA, c'est davantage l'automatisation mécanique qui est sollicitée à cette fin avec le recours aux AGV par exemple. En revanche EIB a particulièrement insisté sur le décisionnel, l'automatisation cognitive, tant pour les middle managers que pour les opérateurs qui ont davantage accès à l'information. Il faut cependant noter que le système de kitting mis en place par EIA vise également à minimiser le risque d'erreur humaine, pour l'opérateur chargé du picking et ensuite pour l'opérateur sur la ligne d'assemblage car une erreur dans la constitution des kits de pièces et ensuite dans l'assemblage est synonyme de non qualité en bout de chaîne, de coût de reprise et de non-respect du lead time vis-à-vis du client.

Les dimensions maintenance prédictive et supervision ne semblent pour l'instant pas pleinement mobilisées par EIA dans le cas de l'usine étudiée, à l'inverse d'EIB qui explique en tirer pleinement bénéfice. En termes de performance opérationnelle, les deux entreprises visent essentiellement le respect ou la réduction du lead time. Au niveau de la performance concurrentielle, elles visent à satisfaire pleinement les demandes de leurs clients, notamment BtoB. Les deux entreprises étudiées visent aussi à pouvoir s'ajuster rapidement aux évolutions du marché en termes de variations de la demande, pour saisir de nouvelles opportunités commerciales, ou pour ne pas perdre la confiance de leurs clients.

4. DISCUSSION

L'étude apporte un éclairage sur les reconfigurations de processus opérationnels mises en œuvre par deux entreprises industrielles pour améliorer la fiabilité de leur système de production grâce à l'IoT. Elle montre que ces entreprises cherchent notamment à minimiser le risque d'erreur humaine par l'automatisation pour performer le lead time qui représente un impératif opérationnel, et qui est également une base de la performance concurrentielle. Nous discutons dans cette section les implications pour le management des opérations et le management stratégique.

4.1. LES FACTEURS INFLUENÇANT LA FIABILITE

Les travaux en management des opérations réduisent souvent la conceptualisation de la fiabilité à la maintenance et/ou à la gestion des stocks. Cet article montre qu'il est pertinent, grâce aux possibilités offertes par l'IoT, d'étendre cette conceptualisation en ajoutant l'automatisation et la supervision. Cependant, l'ensemble des quatre dimensions que nous suggérons pour conceptualiser la fiabilité ne transparaissent pas pleinement dans les pratiques observées chez les deux entreprises de notre étude. EIA en particulier ne se focalise pour l'instant que sur deux dimensions, l'automatisation et la gestion des stocks. Cela s'explique notamment par l'âge moyen élevé de son parc machines. Le responsable IT & industrie 4.0 de l'usine étudiée chez EIA nous a expliqué qu'un investissement pour connecter ces machines (installer des capteurs, installer un PC industriel, etc.) pour collecter des données de fonctionnement ne semble pas pertinent parce qu'il n'émerge pas pour l'instant de besoin de ce type. Cette remarque stimule l'intérêt de recherches futures sur un plus large panel d'entreprises visant à identifier plus précisément les différents facteurs contextuels influençant la mise en place des processus fiabilisant le système de production industrielle grâce à l'IoT. Ces recherches pourraient en sus mettre en exergue les dimensions de la fiabilité qui semblent prioritaires pour les entreprises industrielles en termes d'investissements IoT, et examiner les logiques d'investissement concernant les technologies IoT (efficacité, pressions institutionnelles, mimétisme, recherche de visibilité par labellisation, etc.). Les pratiques observées, au-delà des deux usines étudiées ici, à la fois dans d'autres entreprises contactées ainsi que dans certains discours émanant notamment des PME en France qui

semblent reprocher aux institutionnels (chambres de commerce, ministère de l'industrie, etc.) de prendre le parti des fournisseurs de technologies⁷, méritent que l'on s'y intéresse.

4.2. IOT ET AJUSTEMENT STRATEGIQUE

En management stratégique, quelques travaux ont déjà mobilisé le cadre d'analyse du manufacturing strategy et explicité sa relation avec la performance et la recherche de l'avantage concurrentiel. D'autres ont également conceptualisé ses liens avec la stratégie globale de l'entreprise (Wheelwright, 1984 ; Wheelwright & Hayes, 1985 ; Skinner, 1996). Teece (2006) souligne aussi la nécessité d'un alignement stratégique pour pleinement tirer profit d'une innovation fondée sur la technologie et Agarwal & Brem (2015) montrent dans leur étude de cas que l'introduction de l'internet industriel conduit à un ajustement stratégique. Notre étude confirme ces propositions théoriques et empiriques en montrant que l'introduction de l'IoT pour reconfigurer les processus opérationnels du système de production industrielle est la résultante de plans stratégiques définis aux niveaux hiérarchiques les plus élevés au sein des deux entreprises étudiées pour opérer un ajustement tant externe (répondre aux changements intervenant sur le marché et dans l'environnement) qu'interne (mise en place de processus complémentaires améliorant la performance).

Plus globalement, les observations des pratiques des deux entreprises étudiées sont cohérentes avec les précédents travaux de Dean & Snell (1996), Choe et al. (2015), Hwang et al. (2017), qui ont examiné la contribution d'AMT ou de l'IoT à la performance en contexte industriel. Ces résultats convergents tendent à confirmer la pertinence du cadre d'analyse du MS pour expliquer la performance des entreprises industrielles. Cependant, comme le suggéraient Ferdows & De Meyer (1990), les quatre capacités du MS s'influencent et la reconfiguration de la fiabilité ne peut ainsi expliquer à elle seule l'amélioration de la performance opérationnelle observée. Une analyse combinée des quatre capacités du MS sera probablement plus pertinente pour décrypter l'ensemble des mécanismes opérationnels conduisant à la performance. Par ailleurs, divers facteurs, comme la nature de l'industrie ou l'intensité concurrentielle peuvent influencer la performance. Nous invitons de futures études à analyser ces aspects.

⁷ Voir par exemple l'étude « L'avenir de l'industrie : le regard des dirigeants de PME-ETI sur l'industrie du futur et le futur de l'industrie » publiée en Novembre 2018 par BPI France

4.3. IOT ET AVANTAGE CONCURRENTIEL

Comme rappelé ci-dessus, de nombreuses études ont mis en évidence une relation positive entre l'IT ou les AMT et la performance opérationnelle et économique en contexte industriel, même si elles n'explicitent pas toujours les processus opérationnels reconfigurés à cette fin. Plusieurs de ces études mobilisent le cadre théorique des capacités dynamiques pour analyser la contribution de l'IT à l'acquisition de l'avantage concurrentiel en reconfigurant les capacités opérationnelles actuelles (par ex. Pavlou & El Sawy, 2006, 2011). Les résultats de notre étude de cas montrent également que l'introduction de l'IoT en tant que capacité dynamique est suivie de la reconfiguration de plusieurs processus opérationnels du MS pour améliorer le lead time et s'ajuster aux évolutions des demandes des clients. Ce qui participe à renforcer l'avantage concurrentiel de l'entreprise. Toutefois, plusieurs concurrents directs des deux entreprises étudiées dans cet article ont initié elles aussi, selon la presse spécialisée, la mise en place de solutions IoT. Bien que nous ne connaissions pas les résultats obtenus par ces concurrents à la suite de l'introduction de l'IoT dans leurs opérations industrielles, en dehors de ce qu'en rapporte la presse, il y a tout de même lieu de s'interroger sur la capacité de l'IoT à aider les entreprises à renforcer durablement leur avantage concurrentiel. Comme le rappellent Dean & Snell (1996), la durée de vie de l'avantage concurrentiel tiré d'une nouvelle technologie peut être courte au niveau des premiers concurrents à l'avoir adoptée et inexistante chez les concurrents qui l'adoptent plus tardivement.

CONCLUSION

Notre étude apporte un éclairage sur les reconfigurations de processus mises en œuvre au sein de l'entreprise industrielle pour améliorer la fiabilité du système de production grâce à l'IoT. Elle ne propose en revanche pas une analyse longitudinale pouvant décrypter les itérations et situations d'apprentissage nécessaires. Comme le montre McAfee (2002), les améliorations de processus aboutissant à une meilleure performance ne sont pas contemporaines à l'introduction de l'IT dans les opérations industrielles. Le lead time peut même se dégrader immédiatement suite à l'introduction de technologies IT avant de s'améliorer progressivement après plusieurs mois pour atteindre un niveau supérieur à la situation précédant l'introduction. L'étude n'interroge pas non plus les opérateurs pourtant directement concernés par les reconfigurations de processus du système de production. En dépit de ces limites, les résultats mettent en évidence une configuration permettant d'améliorer la fiabilité du système de

production industrielle et de soutenir la performance. L'étude, en cohérence avec les précédents travaux sur la stratégie industrielle (MS), montre aussi la contribution des capacités opérationnelles à la performance.

REFERENCES

- Abernethy, M.A. et A.M. Lillis (1995), The impact of Manufacturing Flexibility on Management Control System Design, *Accounting, Organizations and Society*, 20 : 4, 241-258.
- Adner, A. et C.E. Helfat (2003), Corporate effects and dynamic managerial capabilities, *Strategic Management Journal*, 24 : 10, 1011-1025.
- Akhtar, P., Z. Khan, S. Tarba et U. Jayawickrama (2018), The Internet of Things, Dynamic Data and Information Processing Capabilities, and Operational Agility, *Technological Forecasting & Social Change*, 136, 307-316.
- Balakrishnan, R., T.J. Linsmeier et M. Venkatachalam (1996), Financial benefits from JIT Adoption: Effects of Customer Concentration and Cost Structure, *The Accounting Review*, 71 : 2, 183-205.
- Ben-Daya, M., E. Hassini et Z. Bahroun (2017), Internet of Things and Supply Chain Management: A literature Review, *International Journal of Production Research*, 1-24.
- Benbasat, I., D.K. Goldstein et M. Mead (1987), The Case Research Strategy in Studies of Information Systems, *MIS Quarterly*, 11 : 3, 369-386.
- Bokrantz, J., A. Skoogh, C. Berlin et J. Stahre (2017), Maintenance in Digitalised Manufacturing: Delphi-based scenarios for 2030, *International Journal of Production Economics*, 191, 154-169.
- Bouslah, B., A. Gharbi et R. Pellerin (2018), Joint Production, Quality and Maintenance Control of two-machine line subject to Operation-Dependent and Quality-Dependent Failures, *International Journal of Production Economics*, 195, 210-226.
- Bozarth, C. et C. McDermott (1998), Configurations in Manufacturing Strategy: A Review and Directions for Future Research, *Journal of Operations Management*, 16 : 4, 427-439.

Brock, D.L. (2001), The Electronic Product Code (EPC) – A Naming Scheme for Physical Objects, White Paper, MIT Auto-ID Center.

Brumme, H., D. Simonovich, W. Skinner et L.N. Van Wassenhove (2015), The strategy-focused factory in turbulent times, *Production and Operations Management*, 24 : 10, 1513-1523.

Cannon, A.R. (2008), Inventory Improvement and Financial Performance, *International Journal of Production Economics*, 115 : 2, 581-593.

Capkun, V., A-P. Hameri et L.A. Weiss (2009), On the Relationship between Inventory and Financial Performance in Manufacturing Companies, *International Journal of Operations & Production Management*, 29 : 8, 789-806.

Chavez, C., W.Yu, M.A. Jacobs et M. Feng (2017), Manufacturing Capability and Organizational Performance: The role of Entrepreneurial Orientation, *International Journal of Production Economics*, 184, 33-46.

Choe, P., J.D. Tew et S. Tong (2015), Effect of Cognitive Automation in a material handling system on Manufacturing Flexibility, *International Journal of Production Economics*, 170, 891-899.

de Leeuw, S. et J.P. van den Berg (2011), Improving Operational Performance by Influencing Shopfloor Behavior via Performance Management Practices, *Journal of Operations Management*, 29 : 3, 224-235.

Dean, J.W.Jr. et S.A. Snell (1996), The Strategic use of Integrated Manufacturing: An empirical Examination, *Strategic Management Journal*, 17 : 6, 459-480.

Eisenhardt, K. (1989), Building Theories from Case Study Research, *Academy of Management Review*, 14 : 4, 532-550.

Eisenhardt, K. et J.A. Martin (2000), Dynamic capabilities: what are they, *Strategic Management Journal*, 21 : 10/11, 1105-1121.

Fatorachian, H. et H. Kazemi (2018), A Critical Investigation of Industry 4.0 in Manufacturing: Theoretical Operationalisation Framework, *Production Planning & Control*, 29 : 8, 633-644.

Feng, Q. et J.G. Shanthikumar (2018), How Research in Production and Operations Management may evolve in the era of Big Data, *Production and Operations Management*, 27 : 9, 1670-1684.

Ferdows, K. et A. De Meyer (1990), Lasting Improvements in Manufacturing Performance: In Search of New Theory, *Journal of Operations Management*, 9 : 2, 168-184.

Gong, X., X. Chao et S. Zheng (2014), Dynamic Pricing and Inventory Management with Dual Suppliers of Different Lead Times and Disruption Risks, *Production and Operations Management*, 23 : 12, 2058-2074.

Gouriveau, R., K. Medjaher, E. Ramasso et N. Zerhouni (2013), PHM – Prognostics and Health Management – De la Surveillance au Pronostic de Défaillances de Systèmes Complexes, *Techniques de l'Ingénieur*, MT9570.

Größler, A. et A. Grübner (2006), An Empirical Model of the relationship between Manufacturing Capabilities, *International Journal of Operations & Production Management*, 26 : 5, 458-485.

Guo, L. (2006), Consumption Flexibility, Product Configuration, and Market Competition, *Marketing Science*, 25 : 2, 116-130.

Helfat, C.E. et S.G. Winter (2011), Untangling dynamic and operational capabilities: strategy for the (N)ever-changing world, *Strategic Management Journal*, 32 : 11, 1243-1250.

Helfat, C. E., S. Finkelstein, W. Mitchell, M. E. Peteraf, H. Singh, D. J. Teece et S. G. Winter (2007), *Dynamic Capabilities: Understanding Strategic Change in Organizations*, Malden: Blackwell Publishing.

Hottenstein, M.P. et J.W.Jr. Dean (1992), Managing Risk in Advanced Manufacturing Technology, *California Management Review*, 34 : 4, 112-126.

Hwang, G., J. Lee, J. Park et T-W Chang (2017), Developing Performance Measurement System for Internet of Things and Smart Factory Environment, *International Journal of Production Research*, 55 : 9, 2590-2602.

Ittner, C.D. et D.F. Larcker (1997), Quality Strategy, Strategic Control Systems, and Organizational Performance, *Accounting, Organizations and Society*, 22, : 3/4, 293-314.

Kern, C. et R. Refflinghaus (2015), Assembly-Specific Database for Predicting Human Reliability in Assembly Operations, *Total Quality Management & Business Excellence*, 26 : 9-10, 1056-1070.

Kern, C. et R. Refflinghaus (2013), Cross-Disciplinary Method for Predicting and Reducing Human Error probabilities in Manual Assembly Operations, *Total Quality Management & Business Excellence*, 24 : 7, 847-858.

Kumar, S., B.S. Purohit, V. Manjrekar, V. Singh et B.K. Lad (2018), Investigating the Value of Integrated Operations Planning: A Case-Based approach from Automotive Industry, *International Journal of Production Research*, 56 : 22, 6971-6992.

McAfee, A. (2002), The impact of Enterprise Information Technology Adoption on Operational Performance: An Empirical Investigation, *Production and Operations Management*, 11: 1, 33-53.

Mitra, D. et P.N. Golder (2006), How does Objective Quality affect perceived Quality? Short-Term effects, Long-Term effects, and Asymmetries, *Marketing Science*, 25 : 3, 230-247.

Lieberman, M.B. et L. Demeester (1999), Inventory Reduction and Productivity Growth: Linkages in the Japanese Automotive Industry, *Management Science*, 45 : 4, 466-485.

Moeuf, A., R. Pellerin, S. Lamouri, S. Tamayo-Giraldo et R. Barbaray (2018), The Industrial Management of SMEs in era of Industry 4.0, *International Journal of Production Research*, 56 : 3, 1118-1136.

Nelson, K.M. et M. Ghods (1998), Measuring Technology Flexibility, *European Journal of Information Systems*, 7 : 4, 232-240.

Pavlou, P.A. et O.A. El Sawy (2011), Understanding the Elusive Black Box of Dynamic Capabilities, *Decision Sciences*, 12 : 1, 239-273.

Pavlou, P.A. et O.A. El Sawy (2006), From IT Leveraging Competence to Competitive Advantage in Turbulent Environments: the Case on New Product Development, *Information Systems Research*, 17 : 3, 198-227.

Powel, T.C. (1995), Total Quality Management as Competitive Advantage: A Review and Empirical Study, *Strategic Management Journal*, 16 : 1, 15-37.

Rymaszewska, A., P. Helo et A. Gunasekaran (2017), IoT powered Servitization of Manufacturing – An Exploratory Case Study, *International Journal of Production Economics*, 192 : C, 92-105.

Sanchez, R. (1995), Strategic Flexibility in Product Competition, *Strategic Management Journal*, 16 : S1, 135-159.

Säfsten, K., M. Winroth et J. Stahre (2007), The Content and Process of Automation Strategies, *International Journal of Production Economics*, 110 : 1-2, 347-354.

Santoro, G., D. Vrontis, A. Thrassou et L. Dezi (2018), The Internet of Things: building a Knowledge Management System for Open Innovation and Knowledge Management Capacity, *Technological Forecasting & Social Change*, 136, 347-354.

Sarac, A., N. Absi et S. Dauzère-Pérès (2010), A Literature Review on the Impact of RFID technologies on Supply Chain Management, *International Journal of Production Economics*, 128 : 1, 77-95.

Skinner, W. (1996), Manufacturing Strategy on the “S” curve, *Production and Operations Management*, 5 : 1, 3-14.

Skinner, W. (1974), The focused factory, *Harvard Business Review*, 51 : 3, 113-121.

Skinner, W. (1966), Production under pressure, *Harvard Business Review*, 44 : 6, 139-145.

Szalavetz, A. (2018), Industry 4.0 and Capability Development in Manufacturing Subsidiaries, *Technological Forecasting & Social Change*, (à paraître) doi.org/10.1016/j.techfore.2018.06.027

Teece, D.J. (2014), The foundations of enterprise performance: dynamic and ordinary capabilities in an (economic) theory of firms, *The Academy of Management Perspectives*, 28 : 4, 328-352.

Teece, D.J. (2007), Explicating dynamic capabilities: the nature and microfoundations of (sustainable) enterprise performance, *Strategic Management Journal*, 28 : 13, 1319-1350.

Teece, D.J., M. Peteraf et S. Leih (2016), Dynamic capabilities and organizational agility: risk, uncertainty, and strategy in the innovation economy, *California Management Review*, 58 : 4, 13-35.

Teece, D.J., G. Pisano et A. Shuen (1997), Dynamic capabilities and strategic management, *Strategic Management Journal*, 18 : 7, 509-533.

Thatcher, M.E. et D.E. Pingry (2004), An Economic Model of Product Quality and IT Value, *Information Systems Research*, 15 : 3, 268-286.

Van Horenbeek, A., J. Buré, D. Cattrysse, L. Pintelon et P. Vansteewegen (2013), Joint Maintenance and Inventory Optimization Systems: A Review, *International Journal of Production Economics*, 143 : 2, 499-508.

Wang, L. et C.Y. Chan (2012), Formulation of a Novel Production Line Monitoring Technique, *International Journal of Production Research*, 50 : 22, 6612-6623.

Want, R. (2011), An Introduction to Ubiquitous Computing in J. Krumm (ed), *Ubiquitous Computing Fundamentals*, Taylor and Francis Group, Boca Raton, USA, 1-35.

Wheelwright, S.C. (1984), Manufacturing Strategy : Defining the Missing Link, *Strategic Management Journal*, 5 : 1, 77-91.

Winter, S.G. (2003), Understanding dynamic capabilities, *Strategic Management Journal*, 24 : 10, 991-995.

Zakarian, A. et A. Kusiak (1997), Modeling Manufacturing Dependability, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 13 : 2, 161-168.

Zammuto, R.F. et E.J. O'Connor (1992), Gaining Advanced Manufacturing Technologies' Benefits: The Roles of Organization Design and Culture, *Academy of Management Review*, 17 : 4, 701-728.

Zollo, M. et S.G. Winter (2002), Deliberate learning and the evaluation of dynamic capabilities, *Organization Science*, 13 : 3, 339-351.

ANNEXES

Annexe A. Guide d'entretien

Connaissance de l'entreprise et intérêt pour l'IoT

Quel périmètre géographique couvre votre poste ? Local/régional ? France ? Monde ?

Quelles technologies connectées/IoT ont été introduites dans les activités de l'entreprise au cours des 5 dernières années ?

Pourquoi l'entreprise s'est-elle intéressée à ces technologies ? A quelles nécessités répondent-elles ?

Introduction de l'IoT et usages opérationnels

Comment et par qui est pilotée l'acquisition et l'introduction des technologies connectées ? Quel sont les rôles précis des managers sur la chaîne d'introduction des technos dans les processus organisationnels, fonctionnels/métiers de l'entreprise ?

Comment les pratiques/processus de l'entreprise, le cas échéant sa culture, et la nature du travail ont-elles/ils évolué à la suite de l'introduction des technologies IoT ? Pouvez-vous nous donner quelques exemples précis (dans les métiers de l'entreprise) ?

Quelles nouvelles compétences ont dû être mises en place pour correspondre aux usages de ces technologies IoT ? Pouvez-vous nous donner quelques exemples illustratifs (dans les métiers de l'entreprise) ?

Les évolutions ci-dessus évoquées à propos des pratiques et de la nature du travail ont-elles entraîné des gains de performance opérationnelle ? Pouvez-vous nous donner quelques exemples illustratifs de gains de performance notés ?