



HAL
open science

MODELISATION DU PROGRAMME DIRECTEUR DE PRODUCTION EN VUE DE LA TRANSITION NUMERIQUE DES PME MANUFACTURIERES

Estefania Tobon Valencia, Samir Lamouri, Robert Pellerin, Alexandre Moeuf

► **To cite this version:**

Estefania Tobon Valencia, Samir Lamouri, Robert Pellerin, Alexandre Moeuf. MODELISATION DU PROGRAMME DIRECTEUR DE PRODUCTION EN VUE DE LA TRANSITION NUMERIQUE DES PME MANUFACTURIERES. 13^{ème} CONFERENCE INTERNATIONALE DE MODELISATION, OPTIMISATION ET SIMULATION (MOSIM2020), 12-14 Nov 2020, AGADIR, Maroc, Nov 2020, AGADIR (virtual), Maroc. hal-03193060

HAL Id: hal-03193060

<https://hal.science/hal-03193060>

Submitted on 8 Apr 2021

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.

MODELISATION DU PROGRAMME DIRECTEUR DE PRODUCTION EN VUE DE LA TRANSITION NUMERIQUE DES PME MANUFACTURIERES

Estefania TOBON VALENCIA, Samir LAMOURI

LAMIH, Arts et Métiers Paristech
Paris, France
estefania.tobon-valencia@ensam.eu,
samir.lamouri@ensam.eu

Robert PELLERIN¹, Alexandre MOEUF²

¹ Département Mathématiques et Génie Industriel,
Polytechnique Montréal, Canada
robert.pellerin@polymtl.ca
²Exxelia, France
alexandre.moeuf@exxelia.com

RESUME : Cet article s'intéresse à la transformation du processus de planification des PME (Petites et Moyennes Entreprises) manufacturières dans le cadre de la quatrième révolution industrielle. Notre étude se concentre sur le PDP (Programme Directeur de Production) . Pour identifier les opportunités d'amélioration du PDP de ce secteur, une cartographie du processus actuel de planification a été élaborée au sein d'un groupe de PME manufacturières. Elle a montré que les acteurs ont besoin d'outils pour supporter la prise de décision, pour améliorer la qualité des données d'entrée et pour proposer des plans qui s'adaptent rapidement aux contraintes internes et externes de l'environnement de production. Nous proposons ici l'intégration de divers groupes de technologies de l'industrie 4.0 aux activités du PDP. Notre proposition permettra aux PME de guider les étapes initiales de la transformation numérique de ce processus de planification et invite les chercheurs à apporter des solutions adaptées à ce secteur à travers plusieurs perspectives de recherche.

MOTS-CLES : PDP, Industrie 4.0, PME, Gestion de production, Modélisation BPMN, Agilité

1 INTRODUCTION

Les technologies et les outils numériques associés au concept d' Industrie 4.0 offrent aux entreprises diverses possibilités pour exécuter, contrôler, optimiser et automatiser leurs processus. Ainsi, différents objectifs sont au cœur des projets industriels du passage au numérique, tels que : la réduction des coûts, l'amélioration de la productivité, une meilleure qualité, l'agilité et la proposition de solutions plus adaptées aux besoins des clients (CEFRIO, 2016 ; Joblot *et al.*, 2019 ; Raymond, 2005).

Depuis quelques années, les PME cherchent à intégrer les avancées technologiques du 4.0 dans leurs processus métier. Toutefois, en raison d'un manque d'expertise technique, les projets de transition numérique peuvent s'avérer complexes pour ce type d'entreprise (Moeuf, *et al.*, 2019). Les PME ont en conséquence besoin de méthodes leur permettant de guider la transformation numérique (Gamache et Abdul-Noir, 2019). Peu d'études scientifiques se sont intéressées aux activités de planification à moyen terme et adaptées au contexte industriel et organisationnel des PME (Tobón Valencia *et al.*, 2019).

Nous proposons dans cet article un modèle d'intégration de groupes technologiques 4.0 dans le processus PDP des PME manufacturières. Nous présentons dans la première section la théorie du processus PDP. Ensuite, nous présentons une cartographie des activités de ce processus qui repose sur des observations au sein d'un groupe de PME et une modélisation BPMN. Cette cartographie nous a permis de soulever plusieurs difficultés associées au processus PDP au sein des PME que nous détaillons à la fin de

la troisième section. Nous proposons dans la quatrième section un modèle d'intégration des technologies 4.0 à un groupe d'activités du processus PDP. Ce modèle ouvre la voie à plusieurs opportunités de recherche que nous évoquons en conclusion dans la dernière section.

2 PDP

Dans un horizon de planification à moyen terme, le PDP définit au niveau des articles directeurs les quantités qui doivent être produites dans chaque période de l'horizon de planification afin de satisfaire la demande des clients dans des conditions de production optimales. Il s'agit d'un processus complexe et essentiel pour traduire les objectifs stratégiques en programmes de production faisables.

Le PDP est une base importante pour la communication entre la gestion des commandes clients et la production. Il permet au service commercial de définir les quantités qui peuvent être réservées aux clients et les dates auxquelles les commandes des clients peuvent être livrées (Jonsson et Ivert, 2015). Deux des trois objectifs du PDP peuvent être récupérés de cette définition, soient assurer la satisfaction des clients à travers le respect des délais de livraison, tout en contrôlant les niveaux des stocks (APICS, 2011 ; Perrot et Villumus, 2018).

Le processus PDP a deux livrables principaux. Le premier livrable est un programme de production qui indique les quantités de produits finis à fabriquer par semaines dans l'horizon PDP. Le second livrable est un programme d'entrée pour l'ordonnancement qui indique le moment de production de chaque ordre de fabrication.

Comme mentionné par Jonsson et Ivert (2015), il existe une différence entre les résultats du PDP et les objectifs que l'entreprise cherche à atteindre avec ce processus. Le PDP indique ce qui doit être produit en fonction d'un ou plusieurs objectifs suivants : augmenter la productivité, utiliser au mieux la capacité disponible, améliorer le service client et maintenir les stocks à un niveau souhaité.

Il y a deux méthodes principales de planification du PDP, par gestion de stock et par exploitation de la connaissance des besoins futurs (Baglin, et al., 2015). La première méthode fait appel à l'utilisation des méthodes de gestion de stock pour gérer le réapprovisionnement. La seconde méthode exploite les prévisions de vente et les commandes fermes pour faire une projection de stock prévisionnel et prendre les décisions de réapprovisionnement sur cette base. Cette méthode permet de répondre aux besoins clients et de minimiser le stock de produits finis.

Nous allons baser notre proposition sur la méthode d'exploitation des prévisions de vente et commandes fermes. Sur cette logique, le processus PDP est réalisé par quatre sous-processus fondamentaux : la planification de la demande, la planification de la capacité et des approvisionnements, la réunion PDP et la gestion de la capacité suite aux CBN (calculs de besoins nets). Nous présentons brièvement ces activités dans chaque sous-processus par la suite.

2.1 Définition des paramètres généraux

Avant d'aborder la planification PDP, il est essentiel de définir les paramètres généraux ou données d'entrée du PDP. D'abord, il faut identifier les ressources critiques ou goulets. Ces postes ont une capacité contrainte qui rythme le flux de production. À partir de cette identification, il sera possible de déterminer le plus long délai de fabrication.

Ensuite, il est indispensable d'identifier les articles directeurs. Ces articles doivent être associés à l'une des familles du PIC (Plan Industriel et Commercial). Leur processus de fabrication alloue les mêmes postes de charge et des temps de fabrication similaire. Ceci permet de leur attribuer une macro-gamme. Au niveau de leur structure, ils nécessitent des composants et matières premières similaires, il est donc possible d'y associer une macro-nomenclature.

Un autre paramètre qui doit être déterminé est l'horizon du PDP. Cet horizon doit avoir une valeur maximale équivalente à la somme des plus longs délais d'approvisionnement et de fabrication. La valeur minimale de cet horizon peut être le plus long délai de fabrication.

Enfin, il est important de traduire les objectifs de l'entreprise pour le PDP en indicateurs de performance : nombre de commandes en retard, niveaux des stocks de produits finis et approvisionnements, adhérence au PDP, coûts associés aux ajustements PDP. La valeur cible de ces indicateurs doit aussi être déterminée.

L'entreprise doit définir la fréquence de mise à jour de ces paramètres pour l'incorporer comme activité du processus. Il est également important d'effectuer une mise à jour des données techniques employées dans ce processus :

commandes et prévisions de demande, stocks des produits finis, stocks des approvisionnements, gammes et nomenclatures (Baglin, et al., 2015).

Pour donner suite à la définition ou à la mise à jour des paramètres et des données techniques, les sous-processus que nous présentons dans les sections suivantes sont exécutés.

2.2 Planifier la demande

La demande du PDP est composée de quatre éléments principaux, la demande du PIC, les besoins confirmés, les besoins non confirmés et les commandes en retard.

Les activités de ce sous-processus cherchent à désagréger la demande du plan de ventes du PIC par article directeur PDP, à mettre à jour les dates de commandes fermes et les hypothèses de la demande (besoins non confirmés). Finalement, il est nécessaire de mettre à jour et d'incorporer dans le calcul de la charge les commandes en retard.

2.3 Planifier la capacité et les approvisionnements

Ce sous-processus comporte trois activités principales : la proposition d'un PDP faisable, l'analyse des charges globales et la définition d'un plan de base pour l'ordonnancement des ordres de fabrication.

La proposition d'un PDP faisable commence par une évaluation des indicateurs de performance du PDP de la semaine précédente. Si ces valeurs sont égales à la cible, il est possible de proposer un PDP pour la demande validée dans le sous-processus précédent. En revanche, s'il y a des écarts entre les valeurs réelles des indicateurs et leur cible, il est nécessaire de déterminer s'il s'agit d'un problème associé aux données de capacité ou bien des données de calcul de la charge. Pour donner suite à cette vérification, les données modifiées doivent être mises à jour.

Pour donner suite à ces corrections, il est important de vérifier la disponibilité des approvisionnements (matières premières, composants, sous-ensembles) pour pouvoir proposer un PDP et conduire l'analyse de charges globales. Ce dernier cherche à déterminer si la capacité disponible dans les goulets est suffisante pour traiter la charge induite par le PDP.

Le PDP permet de proposer un plan d'entrée pour l'ordonnancement qui indique les dates de début et de fin de traitement de chaque commande. Il permet également de calculer le disponible à la vente (les quantités qui peuvent être vendues sans entraîner une modification du PDP). Finalement, il permet de calculer le retard sur les commandes. Ainsi, les coûts associés à ce retard peuvent être déterminés.

2.4 Déroulement de la réunion PDP

Cette réunion a trois objectifs principaux : communiquer la performance du PDP de la période précédente, déterminer les actions à lancer pour donner suite à cette performance et valider le PDP de la période suivante.

La performance du PDP de la période précédente est évaluée à travers les indicateurs de performance définis dans le sous-processus 1. Leurs valeurs permettront d'identifier les risques et problèmes associés (disponibilité des composants, au niveau des stocks et à la capacité disponible. S'il est nécessaire d'améliorer la valeur d'un indicateur, des actions doivent être mises en place. Ces actions doivent être standardisées. Par exemple, quand il y a du retard, afin de livrer dans les meilleurs délais, les actions à lancer peuvent être : travailler en heures supplémentaires, embaucher du personnel, recourir à de la sous-traitance, utiliser la polyvalence et/ou diminuer le temps de réglage.

Pour donner suite à la définition de ces actions, il s'agit de présenter l'analyse des charges globales et le plan de production au niveau des articles directeurs pour la période suivante. La réunion se termine avec la validation de ces éléments.

2.5 Ajuster le PDP pour donner suite au CBN

Pour donner suite au CBN, il est important de vérifier s'il est nécessaire de modifier le plan d'entrée de l'ordonnancement qui avait été proposé dans le sous-processus 3. En outre, le CBN permettra de définir les priorités de ce plan.

Ensuite, le processus d'ordonnancement pourra se dérouler. Il est indispensable à ce point de faire un suivi des entrées sorties (contrôle de flux de charges), pour comparer la charge planifiée par rapport à la production réelle. Ceci permettra de calculer l'adhérence au PDP et de mettre à jour les niveaux de stocks des produits finis.

Le processus PDP est en conséquence complexe. Il rassemble beaucoup d'activités et une prise de décisions importante. Nous allons nous concentrer sur le sous-processus 3 dans les sections suivantes.

3 CARTOGRAPHIE LE PROCESSUS PDP OBSERVES DANS LES PME

Dans le but de proposer un guide approprié pour la transformation du processus PDP traditionnel au sein des PME, il a été nécessaire d'abord de modéliser le processus PDP actuel au sein d'un groupe de PME. Nous avons conduit une étude Delphi-Régnier avec les intervenants de ce processus pour formaliser les activités, les outils et recenser les difficultés.

Nous présentons dans la figure 1 une cartographie du sous-processus 3 actuel, « Planifier la capacité et les approvisionnements ». Dans cette cartographie, le sous-processus 2 de notre partenaire industriel est similaire au processus « Ajuster PDP pour donner suite au CBN » que nous avons décrit dans la section précédente.

3.1 Modélisation BPMN

La modélisation BPMN a été retenue pour modéliser le processus PDP. La version BPMN 2.0 (de l'anglais *Business Process Modelling Notation*) a été proposée en 2011 par l'Object Management Group (OMG). Le standard est disponible en ligne sur le site suivant : <http://www.bpmn.org/>

Le BPMN permet d'avoir une notation compréhensible par toutes les personnes participant à la conception d'un processus. Ainsi, le personnel responsable de modéliser le processus, les développeurs techniques responsables de déployer l'architecture technologique pour exécuter le processus et les responsables du contrôle du processus utilisent un standard de modélisation commun (White, 2004).

3.2 Discussion processus PDP T0

Pour donner suite à la modélisation du sous-processus actuel de notre partenaire industriel, nous avons constaté qu'il y a des difficultés associées aux outils et au processus. Quant aux outils technologiques et systèmes d'information employés dans les activités du PDP, nous avons remarqué que la plupart des activités de calcul sont faites à l'aide d'outils conçus sur Excel. Aucun groupe technologique du 4.0 n'est actuellement employé dans le processus de planification.

Selon l'échelle proposée par le CEFRIO (2016), le processus PDP actuel a un niveau discipliné parce qu'il est soutenu par un ERP. Cependant, les autres outils informatiques utilisés ne sont pas intégrés avec l'ERP.

Les difficultés du processus de planification sont diverses. Tout d'abord, il y a un problème de délégation des fonctions. Le chef planificateur est responsable de plusieurs activités qui pourraient être réalisées par d'autres acteurs du processus PDP. D'autres activités, comme la mise à jour des dates de fin de fabrication sur les lignes de commandes, demandent beaucoup de temps de la part du chef planificateur. Cette mise à jour est faite manuellement dans l'ERP au niveau de chaque commande. Dans le quotidien de l'entreprise, beaucoup d'activités que nous avons modélisées ne sont pas faites par un manque de temps par le chef planificateur.

Le PDP n'est pas actuellement importé dans l'ERP. En conséquence, le CBN n'est pas relié à ce programme.

Les objectifs du PDP n'ont pas été clairement définis. Les indicateurs de performance n'ont pas non plus été précisés. En conséquence, la performance du PDP n'est pas mesurée.

Nous avons également constaté un manque de processus de communication entre les différents acteurs. Le chef planificateur est au cœur de tous les échanges. La plupart des informations sont transmises à l'oral ou échanges de courriels sans être enregistrées dans une base de données ou des rapports.

Les difficultés précédentes expliquent les risques d'apparition de :

- retards dans l'expédition des commandes clients ;

- problèmes de communication entre les interlocuteurs ;
- l'incapacité de gérer des aléas ou événements inattendus et d'adapter le plan par rapport à ces aléas.

En outre, nous n'avons pas pu identifier aucune forme d'agilité dans le processus PDP actuel.

En vue des difficultés identifiées, nous proposons d'intégrer les technologies 4.0 aux activités du processus PDP.

4 PDP 4.0

En l'absence de modèles d'intégration des technologies 4.0 aux approches de planification à moyen terme (Tobón Valencia *et al.*, 2019), il était nécessaire de passer par la consultation d'experts. Nous avons invité un groupe de six experts en Industrie 4.0 à deux ateliers de travail collaboratif. Les objectifs de ces ateliers étaient d'identifier les activités pouvant bénéficier de l'exploitation des groupes technologiques 4.0, pour ensuite sélectionner la technologie la plus adaptable et finalement déterminer la portée attribuée au PDP 4.0.

Nous avons considéré les dix groupes technologiques qui ont été identifiés par le CEFRIO (2016) comme piliers de la quatrième révolution industrielle: les systèmes cyber-physiques (CPS), l'internet des objets (IdO), l'infonuagique, les sciences des données, la cybersécurité, les robots/machines autonomes, la réalité augmentée, les systèmes de simulation, les technologies de communication entre machines et l'intelligence artificielle (IA).

Nous avons modélisé l'association de ces technologies aux activités PDP à l'aide de la méthodologie BPMN. Nous avons ajouté un couloir que nous avons nommé « Technologies 4.0 », dans lequel nous avons déplacé les activités qui exploitent des groupes technologiques 4.0. Nous avons également ajouté le symbole suivante  sur le coin inférieur droit de ces activités.

Nous avons considéré quatre niveaux pour déterminer la portée du PDP 4.0 : surveillance, contrôle, optimisation et autonomie. Le CEFRIO (2016) a défini ces niveaux :

- la surveillance permet d'identifier des changements de situation ou de performance dans le processus à travers des capteurs et des sources de données extérieures ;
- le contrôle rend possible l'interaction entre l'utilisateur et le système pour corriger, personnaliser ou améliorer la performance ;
- l'optimisation intègre l'exploitation des données récupérées du niveau de surveillance avec la capacité de contrôler le système pour faire face aux aléas sans détériorer la performance du système ;
- l'autonomie associe tous les niveaux précédents pour que le système soit capable de s'adapter en temps réel aux préférences de l'utilisateur.

Lors de séances de travail avec les experts, nous avons étudié chaque sous-processus PDP que nous avons décrit dans la section 2. Nous présentons par la suite une synthèse de ce travail pour le sous-processus 3 « Planifier la capacité et les approvisionnements ». Le modèle BPMN

de ce sous-processus est présenté dans la figure 2. Les activités seront identifiées par la suite avec le numéro que nous avons associé dans cette figure. Les événements intermédiaires que nous y présentons comme sous-processus correspondent à ceux que nous avons présentés dans la section 3.

4.1 Intégration technologies 4.0 aux activités de planification de la capacité et des approvisionnements

Pour déterminer la cause d'une mauvaise performance du PDP de la semaine précédente (activité 3.3 -Tn), les experts ont proposé de se servir de l'apprentissage automatique comme technique de l'IA. Pour pouvoir exploiter l'apprentissage automatique, il est nécessaire d'alimenter l'algorithme avec des données associées aux causes de la mauvaise performance et des solutions préalables. Ainsi, l'algorithme pourra proposer une solution en fonction de la cause de la mauvaise performance.

Si l'algorithme d'apprentissage automatique détermine que la cause est associée à la capacité, la simulation peut être exploitée pour modifier la capacité (activité 3.4 - Tn) et pour proposer différents scénarios de mise à jour de capacité (sous-processus 6 -Tn). Ensuite, le responsable de production peut sélectionner le meilleur scénario à l'aide des outils d'optimisation (activité 3.15 -Tn).

Si l'algorithme d'apprentissage automatique détermine que la cause de la mauvaise performance du PDP est associée aux données de la charge, la simulation peut être au service de l'activité 3.5 - Tn, pour proposer des modifications sur les macro-gammes ou bien sur les macro-nomenclatures. L'exploitation des données de flux de production récupérées à travers l'IdO ou des CPS (activité 3.10 - Tn), est importante pour la modification des données exploitées pour le calcul de la charge.

L'IdO peut aussi être utile lors de la vérification de la disponibilité des semi-finies ou des approvisionnements fabriqués en interne (activité 3.11 - Tn). Quant à la vérification de la disponibilité des composants, matières premières ou semi-finies approvisionnées des fournisseurs (activité 3.12 - Tn), l'utilisation de l'IdO ou des systèmes CPS avec de l'infonuagique a été proposée. L'analyse des niveaux d'inventaire des composants (activité 3.14 - Tn), pourrait exploiter l'apprentissage automatique pour faire des prévisions sur la disponibilité des matières dans l'entrepôt.

Lors de la proposition du PDP (activité 3.2 - Tn), les experts ont remarqué que l'exploitation de la simulation avec des outils d'optimisation permettrait d'obtenir un PDP en considérant plusieurs contraintes : rapport charge-capacité, utilisation optimale de la capacité disponible, décalage des dates d'expédition des commandes, variations capacitaires, entre autres. À l'aide de la simulation, plusieurs scénarios PDP peuvent être proposés.

Ensuite, des approches d'optimisation (heuristiques, métaheuristiques ou hybrides) permettront de valider

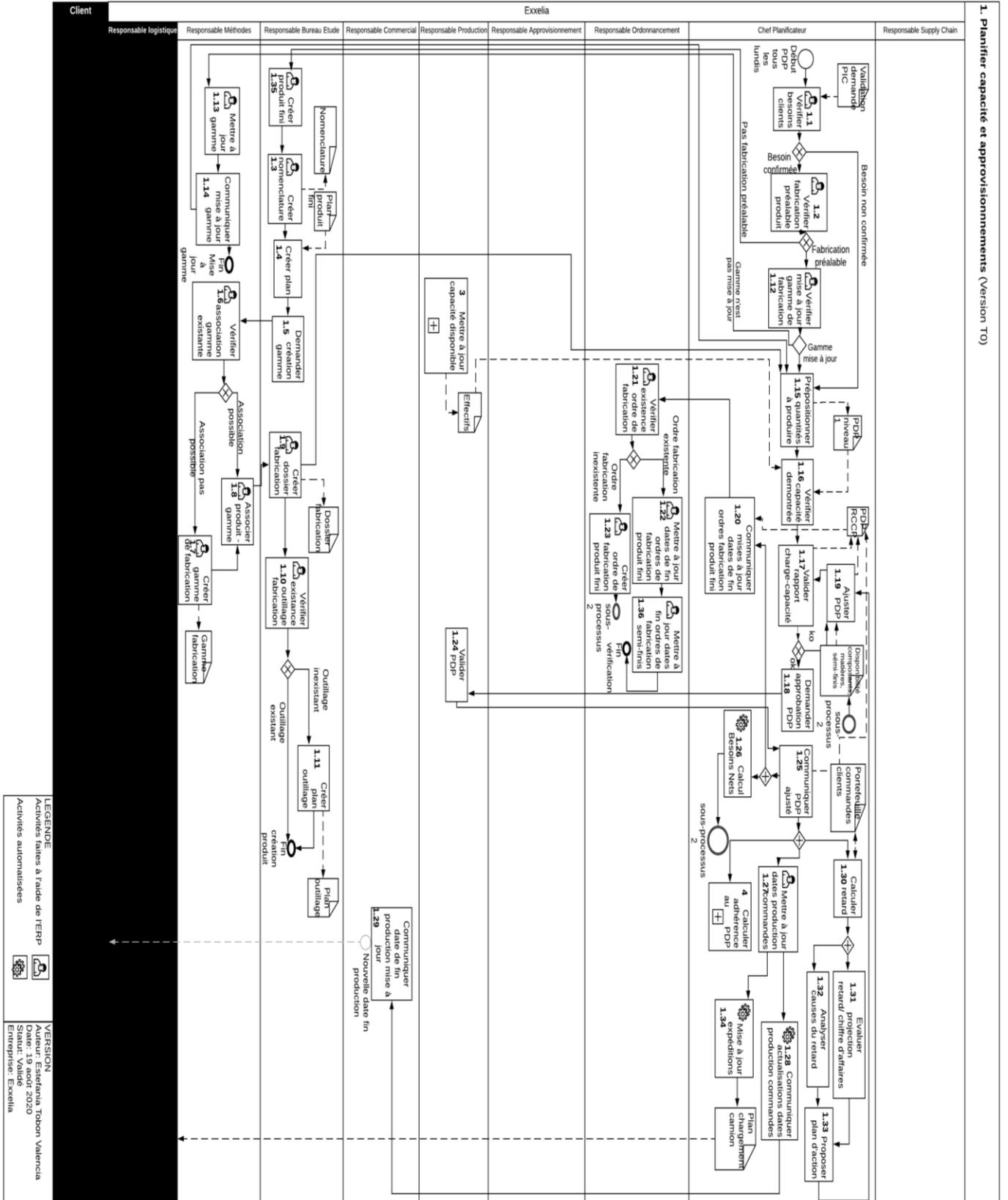


Figure 1 : Modèle représentant le sous-processus « Planifier capacité et approvisionnements » dans le processus PDP des PME manufacturières

LEGENDE
 Activités faites à l'aide de l'ERP
 Activités automatisées

VERSION
 Auteur: Estefania Tobon Valencia
 Statut: Validé
 Entreprise: Exxelia

les scénarios à partir des différents objectifs définis dans le processus PDP pour le niveau des stocks, les coûts des stocks, le retard, le licenciement et l'embauche des opérateurs, la cadence de production, le temps total de production et l'utilisation de la capacité.

L'activité 3.2 -Tn peut être complètement automatisée et proposer un PDP réalisable qui soit importé dans l'ERP (3.20 -Tn). Une autre alternative est de proposer pour donner suite à cette activité (3.2 – Tn) plusieurs PDP, pour permettre au chef planificateur de choisir le meilleur PDP en fonction des contraintes de production du moment. Le chef planificateur pourra ensuite effectuer des modifications à partir de ses connaissances (3.19 - Tn). Le choix parmi ces deux niveaux 4.0, automatisé et optimisé, dépendra du niveau de portée recherché par l'industriel avec le 4.0 (surveillance, contrôle, optimisation, autonomie).

Les coûts des variations capacitaires, de repositionnement de la charge et du retard sont exploités dans l'activité 3.27 - Tn, détermination des coûts associés aux changements PDP. Cette activité, qui cherche à estimer les coûts des changements associés au PDP, peut être faite à l'aide de l'apprentissage automatique.

La sortie de cet algorithme d'apprentissage automatique sera un coût estimé, plus ou moins proche du coût réel en fonction de la quantité et la qualité des données d'entrée. La planification des dates de début et de fin des ordres de fabrication de produits finis (activité 3.24 – Tn), peut être faite avec la simulation pour incorporer les variations capacitaires. L'exploitation des approches d'optimisation sera ensuite nécessaire pour choisir le meilleur plan d'ordres de fabrication en fonction des objectifs de l'entreprise.

Le calcul de la valeur du retard (activité 3.26 –Tn), peut être fait avec de l'apprentissage automatique. Il s'agit d'une prédiction qui considère beaucoup de contraintes et de scénarios associés à des perturbations. L'utilisation d'une approche hybride, d'apprentissage automatique avec un algorithme heuristique ou métahéuristique, permettrait de diminuer le retard et de déterminer la priorité de traitement des ordres de fabrication (activité 3.25 – Tn). L'approche d'optimisation permettrait de vérifier la faisabilité du plan.

4.2 Discussion modèle planification de la capacité et des approvisionnements 4.0

L'atelier avec les experts nous a permis d'identifier deux axes d'amélioration principaux pour le PDP à l'aide des groupes technologiques 4.0. Ces axes sont associés à la surveillance et à l'optimisation.

Le premier axe concerne la fiabilisation des données d'entrée (paramètres du processus). Le pilotage des flux de production en temps réel permet d'une part de fonder les prévisions sur des données plus proches de la réalité et d'une autre part d'améliorer la réactivité des plans face aux aléas de production. Cet axe est associé à la surveillance. Pour les activités du PDP associées à ce niveau, l'IdO et les CPS ont été les groupes technologiques privilégiés par les experts pour récupérer les données en temps réel.

Une autre technologie 4.0 que les experts ont associée au niveau de surveillance est l'infonuagique. La récupération des données des systèmes d'information des fournisseurs, comme les dates de réception des approvisionnements, pourrait être faite en temps réel à l'aide de cette technologie. Les experts ont aussi signalé l'importance d'utiliser la cybersécurité pour accéder aux informations dans le nuage et protéger les systèmes d'information propres à l'entreprise, mais aussi ceux des fournisseurs.

Des autres utilités de l'infonuagique dans le processus PDP évoqué par les experts concernent :

- Le stockage des données de flux de production lorsque l'entreprise manque d'espace dans ses serveurs ou bien lorsque la puissance de calcul de l'entreprise pour les simulations et les calculs d'optimisation ne sont pas suffisants.
- Lors de la planification d'un réseau de production distribué géographiquement, pour permettre d'accéder aux données de flux de production en temps réel des sites de fabrication.

Le deuxième axe d'amélioration comporte l'exploitation des technologies 4.0 pour l'optimisation et le support dans la prise de décisions associées au PDP. La Simulation est la technologie que les experts ont privilégiée pour ce niveau de capacité. Les experts ont remarqué que l'exploitation des approches d'optimisation heuristiques et métahéuristiques s'avérait indispensable pour permettre de faire un choix parmi les scénarios proposés par la simulation.

L'apprentissage automatique comme technique de l'Intelligence artificielle a été employé aussi pour supporter la prise de décisions. Cette technique a été associée à des activités du PDP uniquement lorsque le décideur n'était pas capable de modéliser l'influence des différents paramètres sur l'objet qu'il cherche à calculer, par exemple dans la consolidation des prévisions de la demande (activité 3.3 – Tn). Étant donné que dans le processus du PDP le système et la valeur de paramètres sont souvent connus, les techniques de l'intelligence artificielle ont été très peu utilisées.

Mis à part de l'exploitation de l'IdO, les CPS, la cybersécurité et l'infonuagique pour les activités de pilotage des flux et de la simulation couplée avec des algorithmes d'optimisation ou de l'apprentissage automatique pour le support dans la prise de décisions, les experts ont jugé qu'il n'était pas nécessaire d'associer d'autres groupes technologiques 4.0 aux activités du PDP. La faisabilité du plan est la condition principale que le groupe d'experts a associée au processus PDP. En conséquence, ils considèrent qu'il est possible d'exploiter certaines technologies 4.0, mais il est essentiel de laisser la place à la prise de décisions des différents acteurs du processus PDP.

5 CONCLUSION

En fonction de la stratégie 4.0 définie par l'entreprise, l'automatisation des activités associées à la prise de décisions du PDP peut être plus ou moins élevée.

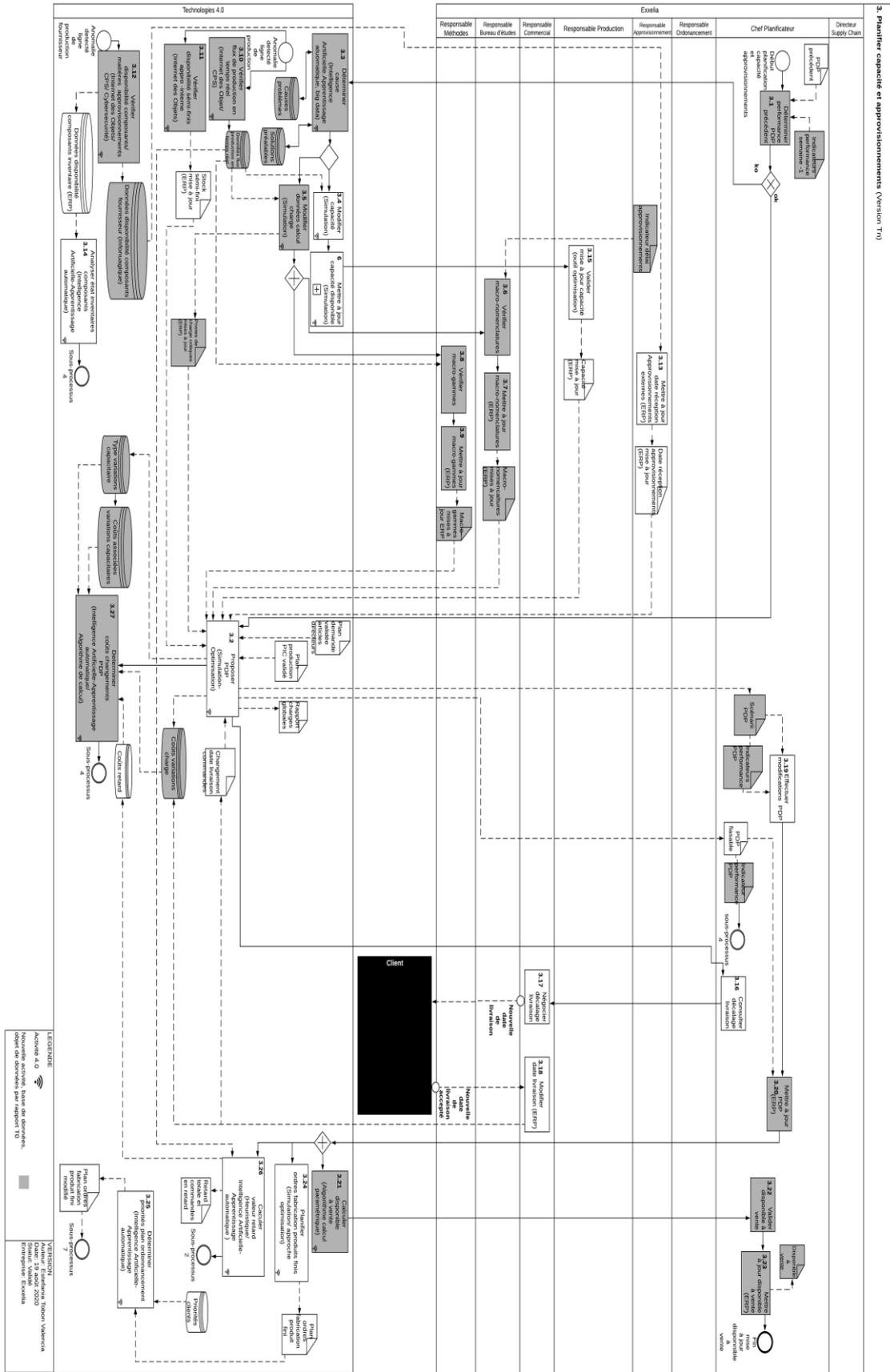


Figure 2 : Modèle représentant le sous-processus « Planifier capacité et approvisionnements 4.0 » dans le processus PDP 4.0 des PME manufacturières

Le sous-processus de planification de la capacité et des approvisionnements 4.0 que nous avons proposé porte sur les niveaux de surveillance et d'optimisation. Les technologies 4.0 permettent de supporter la prise de décisions des différents acteurs à travers l'exploitation des données des flux de production en temps réel et de l'ajustement des plans par le biais de la simulation et des approches d'optimisation.

À l'aide des experts, nous avons donné de la robustesse aux paramètres de ce sous-processus à travers le niveau de surveillance. Le niveau d'optimisation nous a permis de transformer les activités de calcul pour mieux supporter les activités de prise de décisions.

À travers l'intégration de certains groupes technologiques 4.0 nous avons proposé un sous-processus PDP 4.0 plus flexible et réactif. L'utilisation de certains groupes technologiques 4.0 nous a permis de proposer une nouvelle façon de faire certaines activités du PDP. La flexibilité a été atteinte à travers l'exploitation de la simulation pour l'analyse de plusieurs plans de production qui considèrent différents aléas. À l'aide des approches d'optimisation, les responsables de la prise de décisions du PDP peuvent sélectionner parmi ces plans celui qui permet d'atteindre les objectifs en respectant les contraintes du système à un moment donné.

La réactivité a été retrouvée à travers l'IdO ou les CPS pour piloter les flux de production en temps réel et vérifier la disponibilité des composants, matières premières et sous-ensembles en temps réel. Ces données sont utilisées pour proposer des plans PDP (PDP faisable et le plan d'entrée pour l'activité de l'ordonnancement) qui incorporent les changements de l'environnement interne (ateliers de production) et externe (fournisseurs) en peu de temps.

Le travail que nous avons conduit pour proposer le sous-processus planification de la capacité et des approvisionnements dans le PDP 4.0 correspond à la première étape de transition au 4.0. Une perspective de recherche concerne la mise en place de ce processus. À partir de ce modèle, les entreprises doivent d'abord sélectionner les technologies à déployer et les mettre en place après. Ensuite, les entreprises devront chercher à améliorer et à faire évoluer le processus. Il sera convenable à ce moment de mesurer les gains apportés par le 4.0 dans le processus PDP et d'identifier les nouvelles activités à améliorer.

Nous avons fondé la modélisation du processus PDP sur les besoins des PME manufacturières. Il serait, en conséquence intéressant de déterminer si le modèle PDP 4.0 que nous avons proposé est transposable à d'autres contextes industriels.

Une autre perspective de recherche concerne la modélisation BPMN 2.0. Le standard nous a permis de modéliser les processus PDP actuels (T0) sans aucune difficulté. En revanche, lors de la modélisation du processus PDP 4.0, nous avons dû personnaliser l'utilisation des éléments du standard. Ainsi, nous avons créé un couloir des groupes technologiques dans lequel nous avons placé les activités qui exploitent les technologies 4.0 et nous avons indiqué à l'intérieur des activités le groupe technologique 4.0 à utiliser. Lors de la modélisation des processus 4.0 il serait

important de pouvoir spécifier pour chaque activité le groupe technologique, la portée (surveillance, contrôle, optimisation et automatisation), la fréquence d'exécution de l'activité, les coûts et les gains associés à l'exploitation de la technologie.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier le groupe Exxelia pour nous avoir permis de conduire l'étude Delphi-Régnier au sein de ces sites de Chanteloup-en-Brie et Marmoutier et notre groupe d'experts pour leur participation dans les ateliers PDP 4.0.

REFERENCES

- Alberts, F., Hammond, J. & Weil, D. 2003. *Power to the Edge: Command and Control in the Information Age*. APICS The Association of Operations Management. 2011. *Basics of Supply Chain Management-Participant Guide Part I*.
- Baglin, G., Lamouri, S. & Thomas, A. 2015. *Maîtriser les Progiciels ERP*. Paris: ECONOMICA.
- CEFRIO. 2016. *Prendre part à la révolution manufacturière ? Du rattrapage technologique à l'industrie 4.0 chez les PME*. Disponible sur : <https://cefrio.qc.ca/fr/realisations-et-publications/prendre-part-a-la-revolution-manufacturiere-industrie40/>
- Gamache, S. and Abdul-Noir, G. 2019. Stratégie d'implantation de l'Industrie 4.0 dans la PME manufacturière québécoise. *Dans 13^{ème} conférence CIGI Qualita*. Montréal, Canada.
- Joblot, L., Lamouri, S., Deneux, D., Paviot, T. 2019. Modélisation de processus métier en vue de la transition numérique des entreprises du secteur de la rénovation. *Dans 13^{ème} Congrès International de Génie Industriel et Qualita, CIGI Qualita 2019*. Montréal, Canada.
- Jonsson, P. et Ivert, L. K. 2015. Improving performance with sophisticated master production scheduling. *International Journal of Production Economics*. 168, p. 118–130. doi: 10.1016/j.ijpe.2015.06.012.
- Moeuf, A., Lamouri, S., Pellerin, R., Tamayo-Giraldo, S., Tobon-Valencia, E., Eburdy, R. 2019. Identification of critical success factors, risks and opportunities of Industry 4.0 in SMEs. *International Journal of Production Research*, 58(5), p. 1384-1400. doi : 10.1080/00207543.2019.1636323
- Perrot, A. et Villemus, P., 2015. *La boîte à outils de la Supply Chain*. 1st ed, pp. 94-95 . Paris: Dunod.
- Raymond, L. 2005. Operations management and advanced manufacturing technologies in SMEs. *Journal of Manufacturing Technology Management*. 16(8), p. 936-955
- Tobón Valencia, E., Lamouri, S., Pellerin, R., Forget, P., Moeuf, A. 2019. Planification de la production et Industrie 4.0: Revue de la littérature. *Dans 13^{ème} Congrès International de Génie Industriel et Qualita, CIGI Qualita 2019*. Montréal, Canada.