
ÉTUDE DES PISTES

- 3.1 Introduction
 - 3.2 Méthodologie de recherche
 - 3.3 Implémentation et optimisation
 - 3.4 Environnement
 - 3.5 Méthodologie de comparaison et outils de simulation
 - 3.6 Retour d'expériences
-

Cette partie propose un recensement des pistes de recherche proposées par la littérature au sujet du ConWip. Son triple objectif consiste à classer ces axes de recherche, de mettre en évidence les plus prometteurs et d'extraire les principales tendances. L'objectif final consiste à fournir l'orientation innovante qui sera retenue pour la suite de cette thèse.

3.1. INTRODUCTION

3.1.1. Description du ConWip

Dans le but d'améliorer les systèmes de contrôle de production (PCS) existants, tel que le Kanban, Spearman et al (1990) ont développé le ConWip (CONstant Work In Process) afin de fournir un PCS plus flexible et efficace pour un large éventail de contextes de fabrication complexes. Leur objectif principal consistait à construire un PCS approprié pour des industries caractérisées par une variété de produits élevée, la nécessité d'un temps de traversée optimisé et un niveau de demande instable.

Les principales caractéristiques du ConWip sont décrites dans cette section. Spearman et al. (1990) ont été les premiers à introduire le ConWip et à décrire l'ensemble de sa méthodologie. Ils ont ancré leur innovation dans le mécanisme fondamental introduit par Jackson (1963). D'une manière générale, l'objectif principal du ConWip est de contrôler l'encours total sur une ligne de production en le maintenant constant. Cette idée s'appuie sur la loi définie par Little (1961) :

$$\text{Work in Process} = \text{Throughput} * \text{Makespan}$$

Le ConWip utilise les ordres de fabrication produits par un système de type MRP ou autre permettant de fournir une liste ordonnée de tâches afin de sélectionner les références, les quantités et la séquence à produire. Le ConWip vise à maintenir le niveau d'encours constant sur une ligne de production. Un nombre fixe de tickets doit être défini en premier lieu. La ligne directrice est simple : avant d'être envoyée sur la ligne de production, chaque commande doit être accompagnée d'un ticket donnant une « autorisation de production ». Dans le cas où tous les tickets disponibles ont été attachés aux ordres de fabrication, toute nouvelle commande doit attendre au début de la chaîne d'assemblage. L'exécution d'une commande à la fin de la ligne libère le ticket associé qui devient alors disponible pour une nouvelle commande. Cette ligne directrice permet de garder un débit régulier sur la ligne sans pour autant générer d'excès d'encours. L'ensemble du processus est illustré par la figure 10.

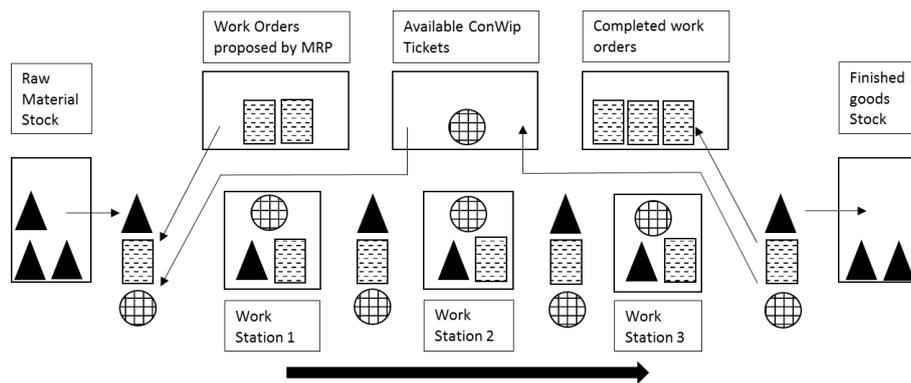


Figure 10. Fondamentaux du ConWip

Les tickets sont représentés par les cercles hachurés. Ces tickets se trouvent soit sur le tableau ConWip, ce qui signifie qu'ils sont disponibles ou sur la ligne de production avec un ordre de fabrication en cours de réalisation. Dans un système piloté par ConWip, le niveau d'encours est limité par le nombre de tickets (douze dans l'exemple illustré par la figure 10). Cette quantité est déterminée lors de la conception de la ligne de production ou avant l'implémentation du ConWip. Elle peut être vue comme un compromis entre le débit et le temps de traversée qui sont ciblés.

Un nombre élevé de tickets augmentera le niveau d'encours, augmentera également le débit jusqu'à un certain point, mais augmentera aussi le temps de traversée. Un petit nombre de tickets réduira le temps de traversée jusqu'à son point bas, mais réduira également le débit en raison d'un effet de rupture de charge. Sur la ligne de production, l'autorisation de production peut être matérialisée par des tickets ou par des contenants de composants. Dans le premier cas, la règle dit que chaque ordre de travail sur la ligne doit correspondre à un ticket. Dans le second cas, la ligne directrice consiste à utiliser les contenants conçus pour le ConWip et seulement ceux-là.

Dans le cas d'une ligne de production avec un nombre élevé de stations de travail, il peut être judicieux de gérer plusieurs boucles ConWip consécutives. Ceci permet de gérer les ordres de fabrication et le stockage des composants entre les boucles. Chaque boucle est indépendante dans ce cas, ce qui signifie qu'elles fonctionnent avec leurs propres tickets. La figure 11 illustre un ConWip qui fonctionne avec deux boucles. Le premier fonctionne avec 9 tickets et le second avec 10 tickets

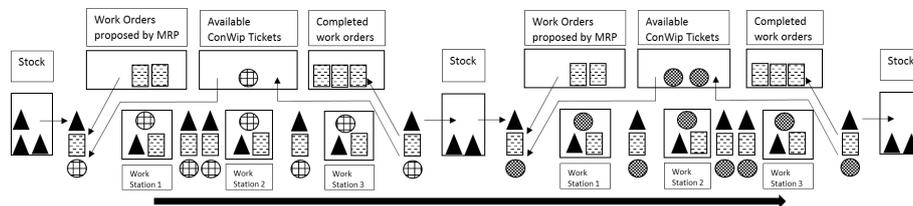


Figure 11. ConWip multiboucle (2)

Dans le cas d'une ligne de production présentant un goulet d'étranglement fixe avec un poste de travail amont sujet à panne, les ordres de fabrication peuvent s'accumuler en amont du goulet d'étranglement. Comme les tickets ne peuvent pas revenir sur le tableau ConWip, aucun nouvel ordre de fabrication ne peut alors entrer dans la ligne. Ceci peut entraîner une rupture au niveau du goulet d'étranglement, réduire le débit sans possibilité de compenser la perte de temps (sauf augmentation de capacité, heures supplémentaires ou externalisation) et engendrer des coûts supplémentaires.

Dans ce cas particulier, il peut être intéressant de libérer des tickets juste en aval du goulet d'étranglement et de laisser les ordres de fabrication continuer sur cette partie de la ligne sans ticket associé (Figure 12). Au contraire, lorsque ce type de problème se produit en aval du goulet d'étranglement, la gestion du ConWip reste stable, car le goulet d'étranglement continue à être alimenté par des ordres de fabrication.

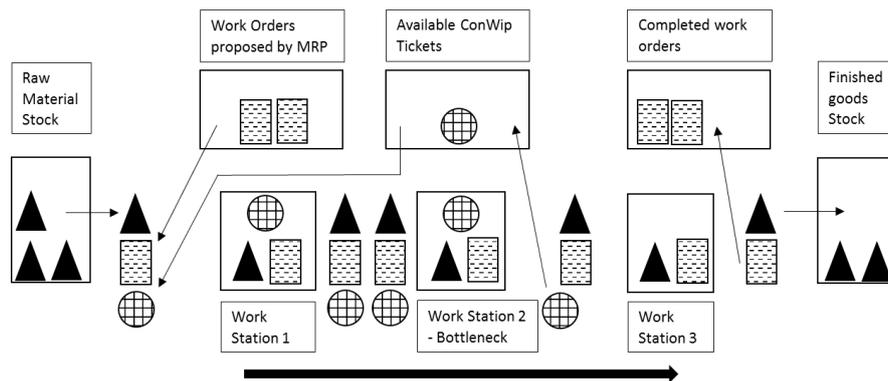


Figure 12. ConWip raccourci pour prendre en compte le goulet d'étranglement.

3.1.2. Questions de recherche

La thématique de recherche abordée par le présent chapitre consiste à étudier les pistes de recherche proposées par la littérature au sujet du ConWip. Cet objectif est atteint en s'appuyant sur la revue de la littérature proposée dans le chapitre précédent. En sélectionnant, en classant et en analysant les perspectives développées dans la littérature liée au ConWip ou à d'autres PCS, mais applicables au ConWip, ce chapitre évalue leurs pertinences et fournit des orientations innovantes pour les industriels et les chercheurs.

En effet, le choix et la personnalisation d'un PCS représentent une question stratégique pour les industriels. Ceci est d'autant plus vrai que les délais de livraison raccourcis, l'amélioration du niveau de service et un niveau d'encours optimisé représentent potentiellement des parts de marché accrues et une amélioration de la performance économique. Dans ce contexte, ce chapitre fournira des orientations originales pour les industriels à travers les pistes de recherche ouvertes de la littérature.

D'un autre côté, elle fournira une image la plus exhaustive possible des perspectives de recherche sur le ConWip à l'attention des chercheurs. Cela leur permettra de sélectionner les meilleures voies de recherche.

3.2. METHODOLOGIE DE RECHERCHE

Comme l'illustre la figure 13, nous identifions les articles intéressants à l'aide des bases de données universitaires suivantes : Elsevier (www.sciencedirect.com), Emerald (www.emeraldinsight.com), Springer (www.springerlink.com), Wiley (www.wiley.com), EBSCO (www.ebsco.com) et IEEE. La recherche par mot clé structurée comprenait les termes suivants : « CONWIP, modified CONWIP, production control system, review, push/pull ». Les articles sélectionnés sont ultérieurs à 2003, car ce chapitre s'inscrit dans la continuité de précédent à vocation d'« État de l'art », ayant lui-même comme objectif de mettre à jour la revue de littérature de Framinan (2003). Après avoir éliminé 1011 documents, nous conservons 88 articles. Pour assurer une couverture complète, la recherche a été étendue à la période de 2000 à 2003. Avec les mêmes critères, 11 articles retenus par Framinan et al (2003) ont été ajoutés. Ensuite, une analyse de tous les articles a été menée. Elle a conduit à exclure 48 articles qui ne sont pas dans notre champ d'application et 15 qui ne proposent pas de pistes de recherche. Cette méthodologie et les limites associées permettent d'aboutir à une sélection finale des études les plus influentes dans le domaine CONWIP, évaluées en fonction du nombre de citations (comme indiqué par le moteur de recherche Google Scholar) et de l'originalité. Ceux-ci constituent la pierre angulaire de cette étude, car ils sont considérés comme les travaux académiques les plus influents dans ce domaine.

Ainsi, 36 articles sont étudiés avec un accent mis sur les 89 pistes de recherche qu'ils proposent. Les axes de recherche sont regroupés en quatre catégories : mise en œuvre et optimisation, environnement, méthodologie de comparaison et outils de simulation, et retour d'expérience. Toutes ces pistes de recherche sont discutées dans les sous-sections suivantes. Elles sont d'abord expliquées. Ensuite, les travaux qui leur sont sous-jacents sont suivis. Une analyse des articles qui citent les auteurs de ces pistes de recherche est menée pour définir si elles ont été étudiées, voire résolues par d'autres auteurs dans de futurs articles.

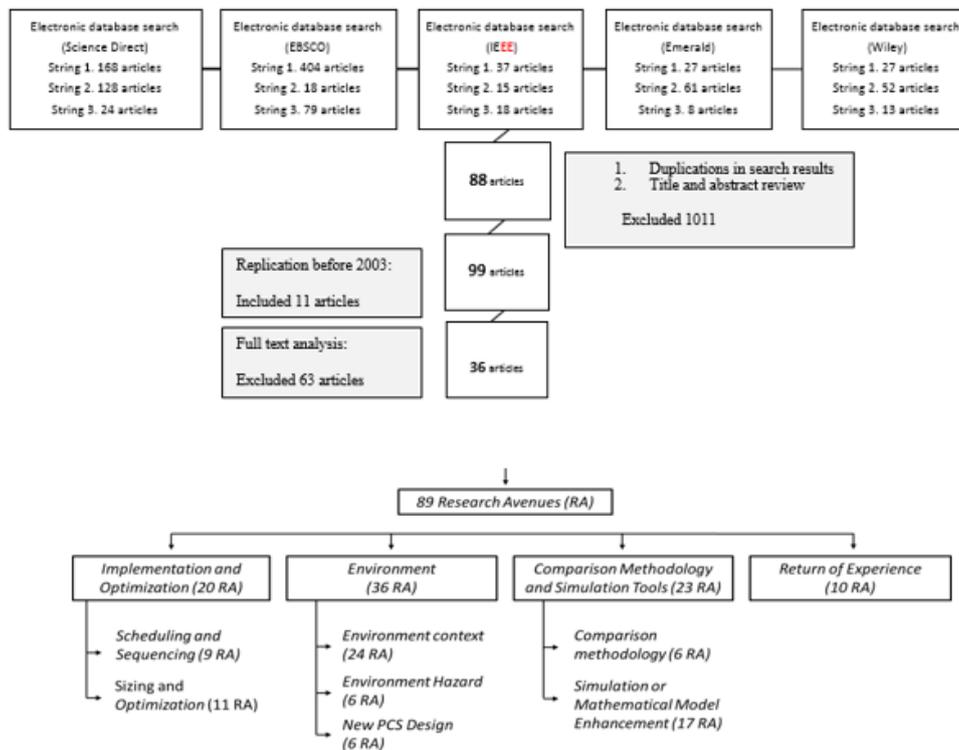


Figure 13. Méthodologie de sélection et de classification des pistes de recherche

3.3. IMPLEMENTATION ET OPTIMISATION

Cette section traite de 20 pistes de recherche (PR) liées à la mise en œuvre et à l’optimisation du CONWIP (tableau 7) et peut être divisée en deux parties. La première concerne le dimensionnement et l’optimisation (DO), ce qui constitue généralement la première question à laquelle il convient de répondre après avoir pris la décision d’utiliser le CONWIP. La seconde partie traite des questions d’ordonnancement et de séquençage (OS) en atelier.

Dans le domaine du dimensionnement et de l'optimisation, la détermination du nombre optimal de tickets est le sujet que les auteurs suggèrent le plus souvent pour de futures recherches. Les pistes de recherche axée sur le nombre de tickets que suggèrent Eng et Sin (2013) et Prakash et Chin (2015) sont intéressantes dès lors que les termes « réactive ou adaptative », « environnemental » et « monitor » sont bien définis et compris. En effet, la problématique de la gestion du nombre variables de tickets requiert une solution complexe qui peut être difficile à appliquer dans un atelier.

En ce qui concerne le dimensionnement et l'optimisation, il est également intéressant de noter les deux voies de recherche liées aux PCS à boucles multiples que Ziengs et al. (2012) et Eng et Sin (2013) proposent. Les deux articles traitent de la grande variété de produits, qui implique souvent le déplacement des goulets d'étranglement.

En ce qui concerne le deuxième groupe traitant des questions de séquençage et d'ordonnancement, l'étude de Framinan et al. (2001) est particulièrement intéressante. Les auteurs proposent d'étendre leurs règles de répartition définies à des scénarios avec des arrivées de charge de travail dynamiques. Ce concept est lié au problème précédent concernant la gestion du nombre variables de tickets, impliquant une augmentation ou une diminution du nombre de tickets en fonction du contenu du carnet de commandes. Bahaji et Kuhl (2008) et Prakash et Feng (2011) considèrent également les règles de répartition. Les premiers explorent cette question en accordant la priorité à certains types d'ordres de fabrication.

Les seconds affinent ce concept en utilisant un critère de produits récurrents/produits marginaux pour définir les priorités. Avec une approche différente, Spearman et al. (1990) soulignent la possibilité d'utiliser le carnet de commandes pour assurer une capacité constante dans la boucle ConWip, en particulier en cas de temps de changements de séries importants. Même s'il a été théorisé il y a vingt-cinq ans, il s'agit là d'un concept qui reste fondamental, puisqu'il a ouvert la porte à un lien entre les gammes opératoires (à travers le prisme des temps de changement de série) et le dimensionnement du ConWip. Germs et Riezebos (2010) et Ziengs et al. (2012) suivent cette piste et suggèrent de baser le dimensionnement du CONWIP sur la charge de travail (ou le « poids des gammes opératoires » des différents produits) plutôt que sur le nombre d'unités à produire.

Selon Ryan et Vorasayan (2005), l'allocation de tickets basée sur les coûts est une piste de recherche plus pertinente que l'allocation basée sur les gammes. Ils proposent de dimensionner le ConWip en utilisant le contenu du carnet de commandes vu sous la perspective du coût.

Tableau 7. Pistes de recherche liées à la mise en œuvre et à l'optimisation

Articles	PR Typologie	Pistes de recherche ouvertes
Spearman and Zazanis (1992)	DO	Définir des gammes opératoires au sein du système ConWip et déterminer le nombre et la taille des ordres de fabrication à associer à chaque gamme
Spearman and Zazanis (1992)	DO	Déterminer la taille des ordres à utiliser pour chaque gamme dans un ConWip
Tardif and Maaseidvaag (2001)	DO	Évaluer l'impact du nombre dynamique de tickets sur les systèmes multi-étapes et multiproduit
Baynat et al. (2002)	DO	Ajout du paramètre de dimensionnement de la taille de lot
Framinan et al. (2003)	DO	Étudier l'impact réciproque des décisions liées au dimensionnement du jeu de tickets et au séquençement des tâches
Framinan et al. (2003)	DO	Évaluer l'impact de la taille de lot sur les performances du système
Ryan and Vorasayan (2005)	DO	Étudier la quantité totale optimale d'encours en plus de sa répartition entre les différents types de produits
Ziengs et al. (2012)	DO	Spécifique à POLCA: étendre les boucles de contrôle pour englober plus de deux stations de travail afin de permettre une vision plus précise de la disponibilité éventuelle de capacité en aval
Eng and Sin (2013)	DO	Évaluer le degré de subdivision des systèmes ConWip multi boucles pour des processus à goulet d'étranglement
Eng and Sin (2013)	DO	Intégrer un système de contrôle hybride pour un meilleur contrôle de nombre de tickets
Prakash and Chin (2015)	DO	Mettre en place un contrôle de tickets pour tenir compte des changements de l'environnement de production
Spearman et al. (1990)	OS	Utiliser le séquençement du carnet de commandes, qui est la clé pour assurer une capacité adéquate quand il y a des temps de changement de série significatifs
Framinan et al. (2001)	OS	Étendre les règles de répartition à des scénarios avec des arrivées de charge de travail dynamiques (exemple d'un carnet de commandes lié à la demande client et entraînant de nouvelles commandes qui peuvent être libérées sans attendre que la production des commandes en cours soit terminée)

Ryan and Vorasayan (2005)	OS	Intégrer des considérations telles que le coût de possession du stock, le coût de production et le coût des ventes perdues (en cas de retard par exemple) pour déterminer la meilleure répartition des tickets parmi les types de produits
Bahaji and Kuhl (2008)	OS	Explorer l'effet des gammes opératoires sur la performance de la production de chaque produit pris séparément
Bahaji and Kuhl (2008)	OS	Explorer l'effet des choix de priorisation sur la performance de la production de chaque produit pris séparément
Germs and Riezebos (2010)	OS	Évaluer l'impact de la libération des ordres de fabrication sur la base de la charge de travail représentée (par opposition à la quantité de produits en jeu ou taille de lot) pour améliorer le temps de traversée
Prakash and Feng (2011)	OS	Vérifier si l'effet d'autres règles de répartition communément adoptées (les règles de répartition par catégorie sont utilisées dans cette étude : produit récurrent ou produit marginal) modifie la performance du ConWip parallèle
Prakash and Feng (2011)	OS	Étudier la possibilité d'augmenter le niveau de service en libérant des tickets plus tôt
Ziengs et al. (2012)	OS	Spécifique au système POLCA : utilisation d'une variante basée sur la charge pour améliorer la capacité d'équilibrage de la charge de travail

Notes: DO – Dimensionnement et optimisation, OS – Ordonnancement et séquençage

Nous suivons les citations de ces articles au sein de la littérature afin de mettre en évidence les liens entre les différents articles et recherches. La figure 14 montre ces liens. Les lignes du graphique représentent les citations des documents avec des pistes de recherche de type DO-OS contenues dans les articles les plus récents, les lignes plus épaisses montrent les pistes de recherche fermées. Certains des articles recensés dans le tableau 7 (comme Bahaji et Kuhl 2008, Ziengs et al. 2012, Eng et Sin 2013 et Prakash et Chin 2015) ne sont pas cités.

Sur 9 axes de recherche liés au dimensionnement et à l'optimisation, un seul est partiellement fermé. En s'appuyant sur (Framinan et al., 2003), Ajarlou et Shams (2013) étudient le niveau d'encours, le niveau de stock et le séquençage de la production afin de minimiser le temps de traversée. Sur les 11 pistes de recherche liées au séquençage et à la planification, une seule est fermée. Takahashi et Hirotsu (2005) se réfèrent à Spearman (1990) et étudient la manière d'ordonner le carnet de commandes afin d'assurer une capacité adéquate.

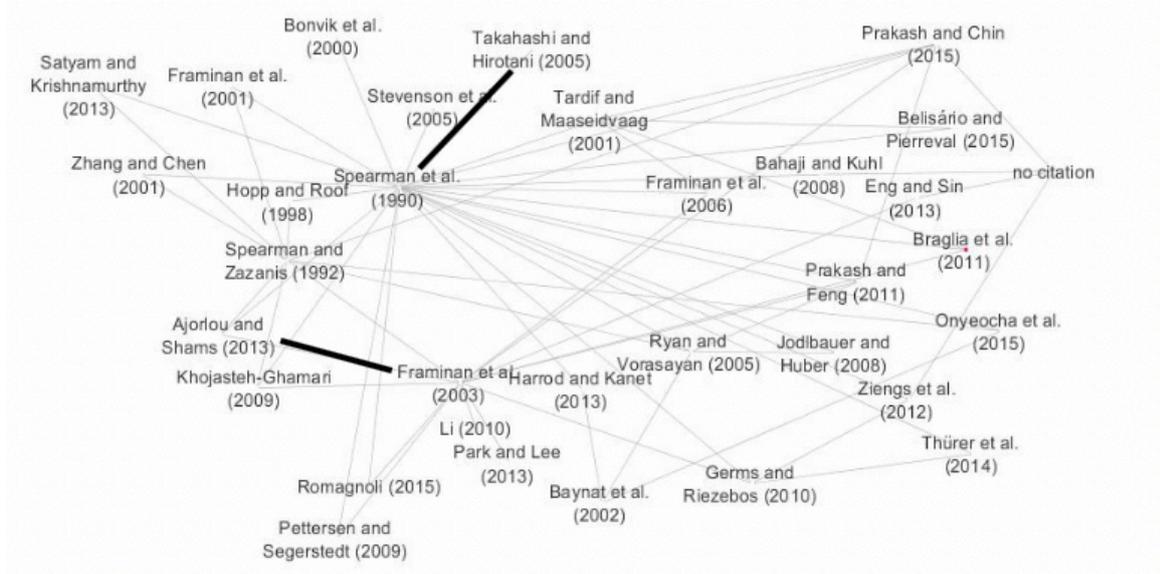


Figure 14. Citations des papiers DO-OS

Parmi les pistes de recherche liées à l’optimisation et à la mise en œuvre du ConWip, plusieurs auteurs abordent la question délicate des chaînes de production non équilibrées (avec les temps de changement de série, les goulets d’étranglement et les problématiques de débit associées) impliquant un nombre constant de tickets, mais des niveaux de charge variables. Ce sujet est une question centrale dans le contexte spécifique de la fabrication à la commande (MTO) un mix produit large et fondamental compte tenu des défis économiques industriels actuels. Il semble également que cette question n’ait pas encore été étudiée en profondeur, c’est la raison pour laquelle nous la soulignons comme un passage obligé pour de futures recherches au sujet du ConWip.

3.4. ENVIRONNEMENT

Le succès et l’efficacité d’un PCS sont bien sûr liés à la qualité de sa mise en œuvre, mais aussi à son adéquation avec l’environnement particulier dans lequel il est utilisé. Ceci est illustré par le grand nombre d’articles qui suggèrent au moins une piste de recherche liée à ce sujet (Tableau 8).

Cette section est donc consacrée à la discussion des pistes de recherche potentielles au sujet du ConWip et concernant :

- le contexte de production (C) dans lequel il sera mis en œuvre,
- la variabilité (V) qui caractérise ce contexte,
- les formats innovants (FI) que le ConWip pourrait adopter pour faire face à ces contextes.

En rassemblant toutes les pistes de recherche dédiées au contexte de production, trois thèmes principaux émergent :

- les caractéristiques du mix-model,
- la typologie de la demande,
- le type d'atelier.

En résumé, les questions clés concernent les environnements de fabrication complexes et les ateliers associés, les politiques de fabrication à la commande, les contextes avec une forte variété de produits et/ou de gammes opératoires. Ceci est cohérent avec l'objectif initial de Spearman et al (1990) qui ont développé le ConWip pour fournir un PCS plus flexible et efficace pour un large éventail de contextes de fabrication complexes (il convient à ce titre de noter que deux des derniers PCS innovants présentés dans la littérature sont orientés vers des produits personnalisés, une demande croissante, la fabrication à la commande et une forte variété de produits : il s'agit de POLCA et COBACABANA qui sont cela dit hors du champ d'étude de cette thèse). Dans ce cadre, le corps de littérature recommande de suivre un certain nombre de lignes de recherche pertinentes dont l'adaptation du ConWip à :

- des lignes de production interconnectées, des lignes en réseau ou des environnements de fabrication complexes (Zhang et Chen, 2001 ; Khojasteh-Ghamari, 2009 ; Parvin et al., 2012 ; Onyeocha et al., 2015)
- des ateliers de type jobshop (Baynat et al., 2002, Bahaji et Kuhl, 2008, Jodlbauer et Huber, 2008, Li, 2010, Ajorlou et Shams, 2013)
- une politique de fabrication à la commande avec un ensemble hétérogène de gammes opératoires des différents produits finis en jeu (Framinan et al., 2006, Harrod et Kanet, 2013, Thürer et al., 2014)

Dans le domaine des pistes de recherche liées à la variabilité, Tardif et Maaseidvaag (2001) proposent de se focaliser sur le système de dimensionnement dynamique de tickets appliqué à un environnement de production capacitaire. Dans ce cas précis, les auteurs recommandent de mesurer comment la capacité variable, les taux de panne, les taux de rebut et les temps de réparation peuvent affecter le nombre optimal de tickets. Takahashi et Hirovani (2005) suggèrent plus généralement d'étudier comment les contraintes sur la capacité affectent un système ConWip. Prakash et Feng (2011) considèrent la question du temps de changement de série dans le cas de ConWip parallèle qui est aussi, plus généralement, pertinente pour tous les types de ConWip au titre des pistes de recherche sur la variabilité. Ajorlou et Shams (2013) suggèrent plutôt d'étudier le caractère aléatoire des temps de fabrication et de changement de séries. Pour conclure cette partie, il est intéressant de noter que Prakash et Chin (2015) mettent en évidence un sujet pertinent concernant la compatibilité du ConWip avec le concept de lean manufacturing. Ce sujet conduit à la question de l'utilisation et du comportement du ConWip dans un processus global d'amélioration continue. Ceci conduit à étudier la robustesse du ConWip dans un processus de production caractérisé par des gammes opératoires variées, des goulets d'étranglements mobiles et, plus généralement, des conditions variables résultant d'un processus d'amélioration continue.

La dernière piste de recherche liée à l'environnement concerne la conception de nouveaux PCS. Spearman et Zazanis (1992) suggèrent d'introduire la notion de gammes opératoires dans le système ConWip. Baynat et al. (2002) font état du concept d'ensembles de références (une référence pouvant correspondre à un produit fini ou à un sous-ensemble manufacturé), impliquant que les tickets sont dédiés à un ensemble et partagés entre toutes les références qui appartiennent au dit ensemble. Bahaji et Kuhl (2008) posent la question de la conception d'un ConWip basé sur l'optimisation de niveaux d'encours distincts au lieu d'une optimisation du niveau d'encours global.

Tableau 8. Pistes de recherche liées à l'environnement

Articles	PR Typologie	Pistes de recherche ouvertes
Hopp and Roof (1998)	C	Proposer de futures recherches adaptées aux environnements autres que ceux du type « vendez tout ce que vous pouvez vendre »
Zhang and Chen (2001)	C	Étendre le modèle pour résoudre des problèmes impliquant des lignes de production multiples et interconnectées
Baynat et al. (2002)	C	Étendre ce cadre (la présente étude s'applique aux systèmes de fabrication constitués de postes de travail en série) à des situations plus générales : systèmes d'assemblage et systèmes parallèles ou ateliers de type jobshop
Stevenson et al. (2005)	C	Développer un système d'aide à la décision pour évaluer la capacité d'un système de contrôle par la charge de travail à améliorer les performances
Takahashi and Hirotsu (2005)	C	Intégrer la distribution des produits finis dans le système
Framinan et al. (2006)	C	Traiter les environnements de fabrication à la commande avec des dates de livraison immuables en utilisant une procédure de contrôle des tickets
Framinan et al. (2006)	C	Étendre la procédure de contrôle des tickets proposée à un environnement multiproduit
Bahaji and Kuhl (2008)	C	Procéder à d'autres tests dans les ateliers de type jobshop
Jodlbauer and Huber (2008)	C	Examiner la robustesse et la stabilité du PCS dans des environnements de travail complexes
Khojasteh-Ghamari (2009)	C	Examiner si les résultats actuels tiennent aussi pour une demande limitée
Khojasteh-Ghamari (2009)	C	Considérer des systèmes de production plus complexes (multiproduit par exemple)
Pettersen and Segerstedt (2009)	C	Étudier les cas d'une machine en situation de goulet d'étranglement et le cas d'une machine présentant temps opératoire très aléatoire
Germes and Riezebos (2010)	C	Le résultat suivant dépend-il de la topologie du système de production : la boucle aval est entièrement responsable de la capacité d'équilibrage de la charge de travail du système POLCA.
Li (2010)	C	Explorer en détail les conditions d'application du ConWip dans un jobshop afin d'en quantifier les avantages
Helber et al. (2011)	C	Étudier la configuration des flux et la conception de la ligne de fabrication fonctionnant en ConWip du point de vue de l'investissement
Parvin et al. (2012)	C	Étendre l'analyse des lignes série aux lignes réseaux

Harrod and Kanet (2013)	C	Dans le cadre d'une fabrication à la commande, l'observation de l'ensemble des gammes opératoires indique-t-elle les cas où la mise en place d'un contrôle du flux est pertinente ?
Park and Lee (2013)	C	L'algorithme peut être étendu à la situation où chaque ligne de production a un stockage en sortie ainsi qu'un stockage tampon
Satyam and Krishnamurthy (2013)	C	Utiliser des blocs du présent modèle pour analyser les systèmes de fabrication multi-étapes et multiproduit fonctionnant sous des politiques de flux tiré
Ajorlou and Shams (2013)	C	Envisagez différentes sélections de machines pour différents types de produits et développez des systèmes de production à base de tickets à destination des flowshop, jobshop et lignes d'assemblage.
Prakash and Chin (2015)	C	Etudier le ConWip au-delà des contextes de production (opérations par projet, logistique et SC)
Thürer et al. (2014)	C	Développer une solution intégrée de planification et de contrôle de la production basée sur des tickets pour les ateliers gérés en fabrication à la commande
Onyeocha et al. (2015)	C	Augmenter le nombre d'étapes du système de fabrication étudié pour comprendre l'effet de la longueur du flux sur le niveau d'encours
Onyeocha et al. (2015)	C	Étude des systèmes de fabrication complexes : ligne de production parallèle/série, augmentation du nombre de produits, différentes familles de produits avec des temps de changement de série complexes à modéliser
Tardif and Maaseidvaag (2001)	V	Évaluer l'impact des systèmes adaptatifs (en termes de nombre de tickets) sur les systèmes capacitifs avec prise en compte de la variabilité de la capacité, du taux de pannes et de réparations
Takahashi and Hirotsu (2005)	V	Évaluer l'effet de la contrainte de capacité
Prakash and Feng (2011)	V	Étudier l'effet du temps de changement de série sur le ConWip parallèle
Ajorlou and Shams (2013)	V	La politique de contrôle multi- ConWip peut être étudiée et comparée à un protocole ConWip à une seule boucle à travers diverses hypothèses tels que le taux de pannes, le taux de réparation, ...
Ajorlou and Shams (2013)	V	Le caractère aléatoire des temps de fabrication et de changement de série doit être étudié
Prakash and Chin (2015)	V	Évaluer la compatibilité du ConWip avec concept lean et dans sa composante amélioration continue (implication pour les outils lean, amélioration continue des non valeurs ajoutées, ...)
Spearman and Zazanis (1992)	FI	Introduire la notion de gammes dans le système ConWip
Bonvik et al. (2000)	FI	Déployer des méthodes similaires pour analyser les systèmes avec plusieurs boucles
Baynat et al. (2002)	FI	Étudier le cas où les tickets sont dédiés à des sous-ensembles de références et partagés entre les références

		appartenant à un même sous-ensemble (mélange entre Kb (dédié) et ConWip (partagé))
Framinan et al. (2006)	FI	Étendre la procédure de contrôle du nombre de tickets proposé à d'autres PCS de type flux tiré
Bahaji and Kuhl (2008)	FI	Evaluer l'utilisation du niveau d'encours total ou l'optimisation des niveaux d'encours par type de produits
Harrod and Kanet (2013)	FI	Affiner le système POLCA en s'appuyant sur l'idée de tickets dédiés

Notes: C – Contexte de production, V- Variabilité, FI – Format Innovant

À l'instar de l'approche proposée dans la partie précédente, nous analysons la suite qui a été donnée aux pistes de recherche mises en lumière par la littérature. La figure 15 montre les liens entre les différents articles étudiés ici. Les articles de Bahaji et Kuhl (2008), Jodbauer et Huber (2008), Helber et al. (2011), Parvin et al. (2012), Ajorlou et Shams (2013), Satyam et Krishnamurthy (2013), Thürer et al. (2014), Onyecha et al. (2015), et Prakash et Chin (2015) ne sont pas cités par les autres auteurs de cette étude.

Sur 24 axes de recherche liés au contexte de production, deux sont repris et étudiés. Germs et Riezebos (2010) se penchent sur l'impact de la boucle ConWip aval sur la capacité d'équilibrage de la charge de travail par un système POLCA. Ziengs et al (2012) répondent en concluant que la limitation du niveau d'encours est bien la plus efficace à la dernière étape de la chaîne. Li (2010) propose d'explorer les conditions d'application du ConWip à un jobshop. Romagnoli (2015) réalise une telle étude pour la configuration jobshop dans un environnement de type fabrication à la commande et dans un contexte multi-conwip.

Sur 6 axes de recherche liés à la variabilité, deux sont examinés. Tagahashi et Hirotoni (2005) se réfèrent à l'effet de la contrainte de capacité. Le modèle de Park et Lee (2013), dans un contexte multiproduit, apporte des réponses à cette question. Belisario et Pierreval (2015) complètent la recherche de Tardif et Maaseidvaag (2001) en s'appuyant sur une programmation génétique visant à déterminer le nombre optimal de tickets.

Sur 6 pistes de recherche liées aux formats innovants, deux sont également explorées. Mhada et Malhamé (2011) suivent la suggestion de (Bonvik et al (2000) et étudient un système avec (n-1) boucles. Onyecha et al. (2015) étudient la piste suggérée par Baynat et al. (2002) : une politique de gestion des tickets partagée et/ou dédiée à un flowshop multiproduit.

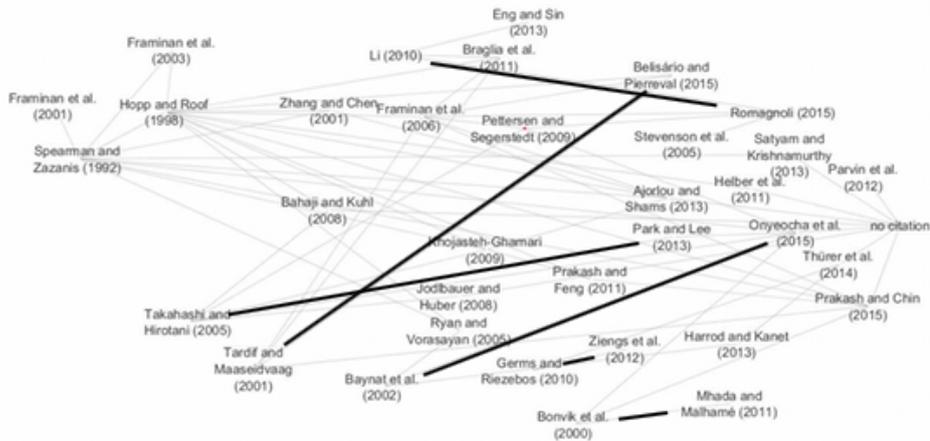


Figure 15. Citations des articles C-V-FI

Grâce à cette section consacrée aux pistes de recherche sur l’environnement de fonctionnement du ConWip, la question centrale des gammes génériques (impliquant que le dimensionnement de l’encours dépende de la charge de travail introduite dans le système) apparaît comme majeure si ce n’est essentielle. En plus de cela, elle n’a pas été couverte par la littérature comme indiqué ci-dessus.

En effet, ce concept est lié à plusieurs idées que différents auteurs mettent en évidence dans la littérature. En outre, l’étude de cette question pourrait contribuer à légitimer le ConWip dans sa capacité à prendre en compte un environnement de production caractérisé par une grande variété de produits et un ensemble hétérogène de gammes opératoires pour les dits produits.

3.5. METHODOLOGIE DE COMPARAISON ET OUTILS DE SIMULATION

Compte tenu de l’impact majeur du choix d’un PCS, la capacité à comparer différentes solutions, simuler et modéliser avec précision chaque PCS constitue une compétence stratégique. Cette section présente les domaines de recherche les plus pertinents pour améliorer les méthodes de comparaison entre les PCS (CM) et améliorer les modèles de simulation ou modèles mathématiques (SMM).

En ce qui concerne les méthodologies de comparaison, six pistes de recherche sont mises en évidence. Framinan et al. (2003) suggèrent des axes de recherche très pertinents étant donné qu'aucun cadre de comparaison complet et général n'est disponible dans la littérature. En outre, ils soulignent que toute comparaison entre deux PCS doit être effectuée en utilisant la configuration optimale de chacun. Pour compléter ce concept et le lier à la section précédente, nous recommandons d'identifier quels paramètres influencent le niveau d'adaptation du PCS et de le distinguer du niveau de performance. Le niveau d'adaptation est déterminé par des paramètres structurels, notamment le type d'atelier (jobshop / flowhop) et la gamme de produits.

Ceux-ci doivent être différenciés des éléments qui affectent le dimensionnement comme le nombre de tickets ou la taille de lot dans la mesure où ces derniers ne sont pas pertinents pour choisir entre kanban et ConWip par exemple. Avant de construire le cadre de comparaison global, une étude spécifique peut être menée pour déterminer quelles caractéristiques intrinsèques de l'usine ou de l'atelier affectent le choix du PCS. Par la suite, le PCS peut être sélectionné, mis en œuvre et dimensionné de manière optimale. Cette approche peut être complétée par Huyet et Paris (2005) qui visent à déterminer les paramètres critiques d'un système de production afin de produire des connaissances sur le comportement du système et enfin de déterminer sa configuration optimale. Deux voies de recherche émergent ici : une définition globale du cadre de comparaison et une méthode de dimensionnement optimale renforcée par un contrôle postérieur.

Baynat et al. (2001) et Tardif et Maaseidvaag (2001) considèrent également des lignes de recherche impliquant des méthodologies de comparaison. Les premiers suggèrent d'utiliser leur nouvelle approche analytique basée sur une analyse des réseaux de files d'attente vers un plus grand panel de PCS de type kanban. Les seconds ont l'intention de comparer le nouveau système de contrôle adaptatif qu'ils ont conçu avec le kanban et le ConWip. Pettersen et Segerstedt (2009) recommandent de vérifier si le ConWip résout ou non le problème « ne jamais induire de rupture de fonctionnement d'un goulet d'étranglement ». Ils prennent une position intéressante, déclarant que si cette suspicion est prouvée, le ConWip devrait être considéré comme supérieur au kanban.

En ce qui concerne les outils de simulation et les modèles mathématiques, 17 pistes de recherche sont mises en évidence et proposent de remplir trois objectifs clés. Le premier objectif consiste à obtenir une meilleure précision pour les outils de simulation soit dans les calculs purs soit dans le but de coller au plus près de la réalité industrielle. En ce qui concerne la précision des calculs, Belisário et Pierreval (2015) recommandent d'utiliser des techniques issues des mathématiques floues (logique floue). Braglia et al. (2011) introduisent des fonctions de densité de probabilité pour modéliser le plus fidèlement possible le temps opératoire de chaque machine. Bonvik et al. (2000) ont l'intention de mettre en œuvre une approche décomposée pour modéliser la distribution des temps de panne au lieu d'utiliser les temps de panne moyens.

Parvin et al. (2012) et Bahaji et Kuhl (2008) proposent d'autres recherches pour permettre à leur modèle de mieux adhérer aux contraintes industrielles. Les premiers visent à assouplir l'hypothèse des « opérateurs standards » dans leur modèle, ce qui implique de prendre en compte les différents niveaux de polyvalence ou d'efficacité. Les seconds recommandent d'ajouter une politique de gestion par lots et une contrainte de date de fin de production en tant que facteurs expérimentaux.

Le deuxième objectif consiste à optimiser les modèles mathématiques ou de simulation. Harrod et Kanet (2013) proposent deux lignes de recherche dans cette veine. Ils suggèrent d'examiner un plus large éventail que celui constitué des trois règles de priorité qu'ils examinent (premier arrivé premier servi, priorité au temps opératoire le plus court, priorité au délai client le plus court) et de construire un modèle mathématique d'un atelier de fabrication à la commande pour répondre à la question de l'atteinte du niveau d'encours optimal. Romagnoli (2015) a l'intention d'optimiser systématiquement les variables de son modèle qui ne reposent que sur l'expérience pratique et le bon sens.

Le troisième objectif concerne une utilisation étendue du modèle mathématique ou de simulation proposée. Satyam et Krishnamurthy (2013) soulignent l'opportunité d'utiliser leur modèle pour évaluer les performances des systèmes qui utilisent des politiques de contrôle de tickets plus génériques, telles que les politiques de contrôle basées sur la charge ou la capacité. Mhada et Malhamé (2011) prévoient d'étendre leur modèle pour optimiser un kanban hybride et un ConWip.

Braglia et al. (2011) recommandent d'examiner la libération des tickets après le goulet d'étranglement et d'analyser les performances obtenues pour les comparer à celles générées par la technique de libération traditionnelle. Bonvik et al. (2000) conçoivent un modèle basé sur des blocs de construction indépendants pouvant être assemblés. Ils suggèrent d'assembler leurs blocs de construction de différentes manières pour modéliser d'autres PCS que le ConWip.

Tableau 9. Pistes de recherche (PR) liées à la méthodologie de comparaison et aux outils de simulation

Articles	Typologie des PR	Pistes de recherche ouvertes
Baynat et al. (2001)	CM	Appliquer la méthode analytique d'évaluation des performances à d'autres systèmes de production de type kanban
Tardif and Maaseidvaag (2001)	CM	Comparer les systèmes adaptatifs au kanban, au ConWip, au base stock et aux nouveaux PCS hybrides
Framinan et al. (2003)	CM	Comparer deux PCS sous la combinaison de paramètres qui donne les meilleures performances pour chacun d'entre eux
Framinan et al. (2003)	CM	Utiliser une étude paramétrique pour comparer le ConWip à d'autres PCS. Par exemple, sachant que le ConWip surpasse le kanban dans un environnement très variable, il faut connaître l'impact de la variabilité mesurée sur les différents PCS (il est peu probable que le kanban soit dépassé pour tout degré de variabilité, y compris le degré zéro)
Khojasteh-Ghamari (2009)	CM	Kanban et ConWip peuvent être comparés à d'autres systèmes de contrôle tels que les hybrides, « base stock » ou les kanban étendus.
Pettersen and Segerstedt (2009)	CM	Vérifier avec les études futures que le ConWip résout le problème du «goulet d'étranglement ne devrait jamais être en rupture de charge» si cette suspicion peut être vérifiée, le ConWip doit être considéré comme supérieur au kanban

Optimisation du ConWip dans un environnement multiproduit

Bonvik et al. (2000)	SMM	Assembler les blocs de construction de différentes manières pour modéliser des PCS autres que ceux qui ont été analysés
Bonvik et al. (2000)	SMM	Mettre en œuvre une approche décomposée pour la distribution des temps de panne (la présente approche utilise la simple moyenne des temps de panne)
Bonvik et al. (2000)	SMM	Développer un jeu d'équations qui modélise (mieux qu'une simple moyenne) la distribution des disponibilités des machines
Bahaji and Kuhl (2008)	SMM	Ajouter une politique de gestion par lots et une contrainte de date de fin de production en tant que facteurs expérimentaux
Khojasteh-Ghamari (2009)	SMM	Certaines méta-heuristiques reconnues telles que l'algorithme génétique et la recherche Tabu peuvent être développées pour trouver la distribution optimale des tickets dans le système Kanban.
Braglia et al. (2011)	SMM	Décrire fidèlement le temps opératoire de chaque machine et associer une valeur statistique du débit au nombre optimal de tickets
Braglia et al. (2011)	SMM	La libération des tickets après le goulet d'étranglement pourrait être étudiée pour mettre en évidence ses performances par rapport à la technique de libération traditionnelle analysée ici
Mhada and Malhamé (2011)	SMM	Étendre le modèle pour l'optimisation du kanban hybride / ConWip
Parvin et al. (2012)	SMM	Assouplir l'hypothèse des travailleurs standard dans le modèle
Harrod and Kanet (2013)	SMM	Étudier un éventail plus large de règles de priorité (au-delà des trois règles simples examinées ici)
Harrod and Kanet (2013)	SMM	Construire un modèle mathématique d'un atelier de fabrication à la commande pour répondre à la question de l'atteinte du niveau d'encours optimal
Satyam and Krishnamurthy (2013)	SMM	Utiliser le modèle pour évaluer les performances des systèmes qui utilisent des stratégies de contrôle de ticket plus génériques, telles que les stratégies de contrôle de charge ou de capacité
Thürer et al. (2014)	SMM	Intégrer la validation de la commande à une étape d'acceptation de la commande dans le modèle de simulation

Belisário and Pierreval (2015)	SMM	Utiliser des mathématiques floues (logique floue) pour extraire des connaissances plus précises en matière de décision
Belisário and Pierreval (2015)	SMM	Réduire le temps de calcul d'un programme de prise de décision génétique (sur l'adaptation dynamique du nombre de tickets)
Belisário and Pierreval (2015)	SMM	Remplacer la programmation génétique par d'autres méthodes d'apprentissage ou d'exploration de données
Romagnoli (2015)	SMM	Optimiser systématiquement les facteurs du modèle (c'est-à-dire ne pas se fier uniquement à l'expérience pratique et au bon sens)

Notes: CM – Méthologies de Comparison, SMM – Outils de Simulation et Modèles mathématiques)

Cinq pistes de recherche sur vingt-trois ont été étudiées. Selon l'axe de recherche de (Bonvik et al., 2000), Mhada et Malhamé (2011) ont construit un bloc qui est dédié au suivi dynamique de l'encours total dans leur modèle. Différents auteurs ont exploré les pistes de recherche de Framinan (2003). Khojasteh-Ghamari (2009) compare le Kanban et le Conwip, Petterson et Segerstedt (2009) comparent le Kanban et le Conwip avec un encours limité, Gems et Riezebos (2010) comparent le Conwip, le système POLCA et le multi-conwip dans un contexte de fabrication à la commande. De plus, Prakash et Feng (2011) étendent la recherche de Khojatesh-Ghamari (2009) à une comparaison entre le Conwip et le Conwip parallèle. La figure 16 montre les liens entre les articles.

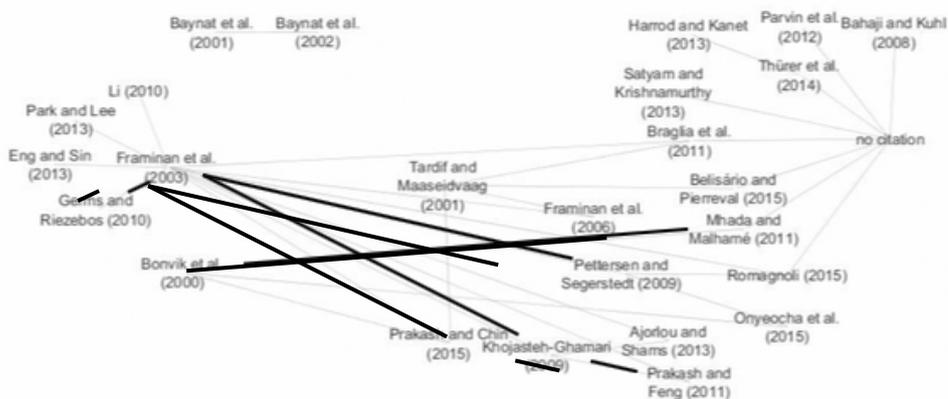


Figure 16. Citations des articles CM-SMM par tous les articles étudiés

Beaucoup d'articles proposent des pistes de recherche sur CM ou SMM. Comme l'illustre la figure 13, il s'agit du deuxième sujet en matière de quantité de pistes de recherche proposées. Néanmoins, compte tenu de la dimension importante de la littérature sur cette question, nous considérons qu'elle n'est pas essentielle pour de futures recherches et nous choisissons de nous concentrer sur les questions de recherche soulevées par les sections 3.3, 3.4 et 3.6. En effet, la littérature fournit déjà beaucoup de modèles de comparaison qui pourraient couvrir un large éventail d'environnements de fabrication et de comparaisons entre les PCS.

3.6. RETOUR D'EXPERIENCES

Cette section est dédiée aux études mettant en évidence le besoin en retours d'expérience (REX) au sujet du ConWip (Tableau 10). Dix articles suggèrent de mener des recherches pour confirmer les performances du CONWIP dans un contexte industriel, en mettant en avant deux objectifs principaux : valider certains résultats théoriques et valider la comparaison entre les différentes conceptions de PCS.

Cinq articles examinent la question de la validation des résultats théoriques. Lorsqu'ils ont décrit pour la première fois le ConWip, Spearman et al. (1990) ont expliqué qu'ils souhaitaient poursuivre leur recherche en faisant référence à une implantation dans une usine de circuits imprimés pour décrire une application industrielle, ce qui constitue le premier appel à un retour d'expérience. Hopp et Spearman (1991) comparent plusieurs moyens d'évaluer le débit et le temps de cycle dans une chaîne de production fonctionnant avec un ConWip. Ils montrent les résultats théoriques et positifs du ConWip puis suggèrent de le mettre en œuvre dans un atelier réel. Zhang et Chen (2001) conçoivent un modèle mathématique pour les chaînes de production pilotées par un ConWip afin d'optimiser à la fois la séquence de production et la taille des lots.

L'une des principales voies de recherche qu'ils ont l'intention de poursuivre consiste à appliquer leur modèle pour résoudre un problème pratique. Pettersen et Segerstedt (2009) appellent à un retour d'expérience qui leur permettrait d'examiner et d'apprendre comment le ConWip pourrait facilement être installé dans différentes applications pratiques. Prakash et Chin (2015) examinent et classent les systèmes ConWip modifiés et mettent en évidence un manque d'illustrations pratiques des problèmes de conception du ConWip. Pour conclure ce paragraphe, Thürer et al. (2014) affinent le PCS à base de tickets appelés COBACABANA. Chaque ticket représente un niveau de charge de travail et non un nombre de produits. Ils indiquent une piste de recherche pertinente dans la mise en œuvre de COBACABANA sur un cas réel afin de confirmer son niveau de performance.

Le deuxième objectif d'un retour d'expérience consiste à confirmer la surperformance d'un PCS à travers une démonstration pratique. Quatre articles suivent cette tendance. Spearman et Zazanis (1992) démontrent la supériorité des systèmes en flux tiré par rapport aux systèmes en flux poussé. Les raisons majeures résident dans leur propension à produire moins de congestion, dans leur caractère plus facile à contrôler et dans leur aptitude à limiter le niveau d'encours. Ils montrent également, au sein de la famille des systèmes à flux tiré, que le ConWip surpasse le kanban. Dans ce contexte, ils ont recommandé comme une voie de recherche pertinente certains sites de test pour valider leurs conclusions au sujet du ConWip. Tardif et Maaseidvaag (2001) définissent quant à eux un nouveau système kanban adaptatif consistant à autoriser un nombre variable de tickets en fonction des niveaux d'inventaire et de commande. Ils ont l'intention de comparer ce système au ConWip et de souligner la nécessité d'une étude de cas formelle dans un environnement de fabrication complexe. Jodlbauer et Huber (2008) comparent plusieurs PCS avec le ConWip dans une perspective de robustesse et de stabilité et appellent à d'autres études similaires avec des applications dans le monde industriel. Enfin, Prakash et Feng (2011) tentent de résoudre le problème du niveau d'encours dans un environnement de production caractérisé par un mix produit élevé. Ils considèrent un système en flux poussé, un ConWip et un ConWip parallèle. Ils concluent en soulignant la nécessité de poursuivre leurs recherches par le biais de l'analyse d'un essai de fonctionnement grandeur nature dans un atelier.

Tableau 10. Pistes de recherche liées aux retours d'expériences

Articles	PR Typologie	Pistes de recherche ouvertes
Spearman et al. (1990)	REX	Terminer la mise en œuvre de l'approche ConWip dans une grande usine de circuits imprimés et la décrire dans un article ultérieur
Hopp and Spearman (1991)	REX	Une stratégie ConWip devrait être envisagée par les industriels pour une mise en œuvre dans des ateliers réels
Spearman and Zazanis (1992)	REX	Effectuer un test industriel
Tardif and Maaseidvaag (2001)	REX	Mener des études de cas formelles pour examiner les résultats des systèmes adaptatifs dans les systèmes de fabrication complexes actuels
Zhang and Chen (2001)	REX	Appliquer le modèle développé pour résoudre les problèmes pratiques dans les entreprises de fabrication en utilisant le ConWip
Jodlbauer and Huber (2008)	REX	Examiner la robustesse et la stabilité des PCS dans les applications du monde réel
Pettersen and Segerstedt (2009)	REX	Une extension importante pour d'autres études consisterait à examiner et apprendre comment le ConWip pourrait facilement être installé dans différents cas pratiques
Prakash and Feng (2011)	REX	Mettre en œuvre un système de ConWip parallèle et montrer en quoi cela diffère de la mise en œuvre conventionnelle du ConWip
Prakash and Chin (2015)	REX	La traduction des problèmes de conception en cas pratiques rendra le ConWip applicable à divers scénarios de fabrication
Thürer et al. (2014)	REX	Mettre en œuvre concrètement le système COBACABANA pour confirmer les améliorations de performance observées dans cet article

Notes: REX - Return of Experience

Seule la piste de recherche proposée par Petterson et Segerstedt (2009) est explorée par Onyeocha et al (2015) et Romagoli (2015). Ils examinent l'application du Conwip dans trois cas (2-3-4 produits), et dans une configuration générale d'atelier.