HAL
open science

Optimisation du ConWip dans un environnement multiproduit

Yann Jaegler

To cite this version:

Yann Jaegler. Optimisation du ConWip dans un environnement multiproduit. Génie des procédés. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM, 2018. Français. NNT : 2018ENAM0038 . tel-02064830

HAL Id: tel-02064830

https://pastel.hal.science/tel-02064830

Submitted on 12 Mar 2019

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.

2018-ENAM-0038

École doctorale n° 432 : Science des Métiers de l'ingénieur

Doctorat ParisTech

T H È S E

pour obtenir le grade de docteur délivré par

l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers

Spécialité " Génie Industriel "

présentée et soutenue publiquement par

Yann JAEGLER

le 07 décembre 2018

Optimisation du ConWip dans un environnement multiproduit

Directeur de thèse : **Samir LAMOURI**
Co-encadrement de la thèse : **Damien TRENTESEAUX, Patrick BURLAT**

Jury

M. Bernard GRABOT, Professeur des Universités, ENI Tarbes	Président
Mme. Caroline THIERRY, Professeure, Université de Toulouse	Rapporteur
M. Pierre BAPTISTE, Professeur, Ecole polytechnique de Montréal	Rapporteur
Mme. Séverine DURIEUX, Maître de Conférence, SIGMA Clermont-Ferrand	Examinateur
M. Samir LAMOURI, Professeur, Arts et Métiers ParisTech	Examinateur
M. Damien TRENTESEAUX, Professeur, UVHC	Examinateur
M. Patrick BURLAT, Professeur, Directeur Général WIPSIM	Examinateur

T H È S E

Arts et Métiers ParisTech - Campus de Paris
LABORATOIRE LAMIH UMR CNRS 8201

REMERCIEMENTS

Mes remerciements vont à mes directeurs de thèse pour la confiance qu'ils m'ont témoignée, pour le niveau d'exigence qu'ils ont su me transmettre et pour les conseils qu'ils m'ont prodigués avec beaucoup de bienveillance.
Je remercie également Fatima Mahda pour son aide ainsi que les membres du jury pour leurs questions, leurs remarques et la riche discussion qu'ils ont suscitée.

TABLE DES MATIERES

LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX **4**
1 INTRODUCTION **7**
1.1 CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE 8
1.2. OBJECTIFS 10
1.3. METHODOLOGIE DE TRAVAIL 11
1.4. STRUCTURE DU DOCUMENT 12
2 ETAT DE L'ART **14**
2.1. METHODOLOGIE DE RECHERCHE 16
2.2 DIMENSIONNEMENT DU CONWIP 22
2.3. LE SYSTEME CONWIP DANS DIVERS CONTEXTES 31
2.4. LE CONWIP COMPARE AUX AUTRES PCS 37
2.5. APPROCHES DE RECHERCHE ET TYPOLOGIE DES MODELES UTILISES DANS LES ETUDES SUR LE CONWIP 44
2.6. SYSTEME DE DECISION ET DE MISE EN ŒUVRE DU CONWIP 50
3. ÉTUDE DES PISTES DE RECHERCHE **56**
3.1. INTRODUCTION 57
3.2. METHODOLOGIE DE RECHERCHE 61
3.3. IMPLEMENTATION ET OPTIMISATION 62
3.4. ENVIRONNEMENT 66
3.5. METHODOLOGIE DE COMPARAISON ET OUTILS DE SIMULATION 72
3.6. RETOUR D'EXPERIENCES 78
4. DEFINITION ET EVALUATION DES ALGORITHMES GENERATIFS DE GAMMES ENVELOPPES **83**
4.1. INTRODUCTION 84
4.2. CONTEXTE 87
4.3. FORMULATION DU PROBLEME 89
4.4. METHODOLOGIE 93
4.5. RESULTATS 99
5.CONCLUSION ET PERSPECTIVES **112**
5.1 APPORTS 113
5.2 CONCLUSIONS 115
5.3 PERSPECTIVES 115
6. BIBLIOGRAPHIE **117**

LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

Figure 1. Méthodologie 11
Figure 2. Synoptique de thèse 12
Figure 3. Principe du ConWip 17
Figure 4. Cartographie de la recherche scientifique 19
Figure 5. Questions de recherche 21
Figure 6. Implémentation d'un ConWip 22
Figure 7. Facteurs d'implémentation d'un ConWip 25
Figure 8. Facteurs liés à l'environnement ConWip 31
Figure 9. Schéma de prise de décision et de mise en œuvre du ConWip 52
Figure 10. Fondamentaux du ConWip 58
Figure 11. ConWip multiboucle (2) 59
Figure 12. ConWip raccourci pour prendre en compte le goulet d'étranglement. 60
Figure 13. Méthodologie de sélection et de classification des pistes de recherche 62
Figure 14. Citations des papiers DO-OS par tous les articles étudiés 66
Figure 15. Citations des articles C-V-FI par tous les articles étudiés 72
Figure 16. Citations des articles CM-SMM par tous les articles étudiés 77
Figure 17. Citations des articles REX par tous les articles étudiés 81
Figure 18. Processus de recherche 94
Figure 19. Ensemble du processus 99
Figure 20. Processus de résolution de la question de recherche 114
Figure 21. Schéma de résolution 114

Tableau 1. Analyse des documents traitant d'un sujet de mise en œuvre 22
Tableau 2. Analyse des articles traitant de l'environnement industriel dans lequel est implémenté le ConWip..... 32
Tableau 3. Vue d'ensemble des articles impliqués dans une analyse de comparaison 38
Tableau 4. Présentation des documents référencés utilisant des techniques de simulation 45
Tableau 5. Vue d'ensemble des documents référencés utilisant des modèles mathématiques. 48
Tableau 6. Aperçu des documents de référence axés sur des Rex ou revues de la littérature.. 49
Tableau 7. Pistes de recherche liées à la mise en œuvre et à l'optimisation..... 64
Tableau 8. Pistes de recherche liées à l'environnement..... 69
Tableau 9. Pistes de recherche (PR) liées à la méthodologie de comparaison et aux outils de simulation 75
Tableau 10. Pistes de recherche liées aux retours d'expériences 80
Tableau 11. Poids dans le mix modèle associés à chaque produit..... 100
Tableau 12. Gammes enveloppes obtenues..... 100
Tableau 13. Paramètres optimisés du ConWip..... 102
Tableau 14. Résultats de la sensibilité aux variations du mix produit..... 103
Tableau 15. Scénarii des différentes séquences de produits 104
Tableau 16. Résultats de la sensibilité aux variations de séquences des produits..... 105
Tableau 17. Résultats des temps opératoires élevés 106
Tableau 18. Résultats du test avec un nombre élevé d'opérations 107
Tableau 19. Synthèse 109

1 INTRODUCTION

"C'est l'instable qui est le fixe. C'est sur l'incertain qu'il faut baser ».
Eugène Delacroix

1.1.Contexte et problématique
1.2. Objectifs
1.3.Méthodologie de travail
1.4. Structure du document

1.1 CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE

Dans un contexte totalement mondialisé au sein duquel les marchés sont ultra-majoritairement concurrentiels, la sélection naturelle entre les entreprises industrielles est à l'œuvre quotidiennement. Pour faire face à cette réalité, ces dernières cherchent pour la plupart à développer leur **capacité à s'adapter** à leur environnement. Celui-ci est aujourd'hui volontiers qualifié de « VUCA World » (Volatile, Uncertain, Complex, Ambigous) ce qui montre combien il est mouvant, difficile à prévoir voire à comprendre et parfois même en opposition avec lui-même. Dans un tel écosystème, comment une entreprise peut-elle s'adapter à la concurrence, aux évolutions de ses marchés (évolutions normatives, de modes, technologiques ou comportementales par exemple) ou encore à la demande de ses clients ? L'**innovation** et la course à l'**agilité** figurent probablement en bonne place dans le classement des réponses possibles à cette question cruciale.

L'**innovation** est aujourd'hui partout requise. Si elle était, il y a peu de temps encore, essentiellement considérée sous l'angle de la technologie, des études, de la recherche et développement, elle s'invite à présent aussi bien sur le terrain managérial, sur le terrain organisationnel, sur le terrain de la relation ou client ou sur celui de la gestion des flux. C'est sur ce dernier champ que se positionnera cette thèse.

L'**agilité** est quant à elle une source substantielle davantage concurrentiel. Elle peut être la clé pour ouvrir de nouveaux marchés grâce à sa contribution à la performance économique de l'entreprise, à la qualité du service client et à la quantité d'options qu'elle offre aux décideurs. **Nous avons par conséquent choisi de positionner nos recherches sur le terrain de l'innovation en matière de gestion des flux au service de l'agilité de l'entreprise.**

Beaucoup d'industriels formalisent une stratégie dite de « **digital manufacturing** ». De la même manière que le digital a compris, de manière très pragmatique, la nécessité de se centrer sur l'humain (sans quoi il n'intéresse pas l'humain : réseau social, réalité mixte ou augmentée…), il est intéressant de constater que ces stratégies digitales se centrent très pragmatiquement sur des sujets à fort effet de levier économique. En particulier, on observe qu'un des grands enjeux de demain, à savoir **la capacité à maîtriser les niveaux de stocks et d'encours**, attire leur attention. En effet, dans un monde où la diversité croissante des produits est de mise (la « mass customisation » est parfois même considérée comme la quatrième révolution industrielle dans l'automobile) et où la synchronisation parfaite des technologies employées par les processus successifs n'est guère envisageable (comment synchroniser des processus d'injection et de peinture qui se succèdent classiquement ?), il apparaît clairement que cet enjeu de maîtrise des stocks et des encours passe par **la capacité à innover en matière de gestion agile des flux**.

Dans cette logique, nous avons naturellement choisi de nous intéresser à un outil dit de gestion des flux ou de contrôle de la production (PCS) agile, au sujet duquel les pistes d'innovations sont nombreuses, à savoir le ConWip. Nous étudierons en particulier la question de son optimisation dans un environnement multiproduit et sujet aux aléas.

1.2. OBJECTIFS

L'optimisation d'un système de contrôle de la production, quel qu'il soit, est un enjeu clé pour une entreprise industrielle. En effet, la qualité de cette optimisation conditionnera une partie de la performance économique de l'entreprise, mais aussi son aptitude à remplir durablement son carnet de commandes à travers le prisme du taux de service client. Le ConWip ne fait évidemment pas exception à cette règle.

Nous verrons que l'optimisation d'un système ConWip consiste à dimensionner un certain nombre de paramètres qui le caractérise, en particulier la taille de lot et le nombre de tickets. S'il est relativement aisé de proposer une réponse à cette problématique dans un contexte de production monoproduit, il en va tout autrement dans un contexte multiproduit. Le défi augmente encore lorsque ce contexte multiproduit est considéré dans sa réalité d'environnement fluctuant et sujet aux aléas.

Dans ce contexte, l'objectif de cette thèse consiste à répondre à la question suivante : comment peut-on décider quels paramètres utiliser pour dimensionner un système ConWip dans un environnement multiproduit en mouvement ?

Pour atteindre ce but, **quatre algorithmes sont proposés, testés et qualifiés afin d'aboutir à des solutions adaptées à différents types d'environnements**. La méthodologie de travail ayant permis d'atteindre ce résultat aura au préalable conduit à trois résultats importants :

- **Une mise à jour de l'état de l'art au sujet du ConWip**,
- La mise en évidence d'**un processus d'aide à la décision pour l'implémentation d'un ConWip** à l'attention des industriels,
- **Une étude complète des pistes de recherche ouvertes par la littérature au sujet du ConWip** à l'attention de la communauté scientifique.

1.3. METHODOLOGIE DE TRAVAIL

Cette thèse s'inscrit dans le cadre des problèmes d'optimisation des ateliers de production pilotés par un ConWip. Un **état de l'art** liminaire permet de cadrer le sujet. Il est suivi par **une étude et une classification des pistes de recherche** proposées par la littérature. Cette dernière permet d'aboutir à la formulation de la problématique. Sur cette base, une approche du problème est proposée. Celle-ci s'appuie sur la conception de quatre algorithmes qui sont testés et qualifiés sur un jeu de données afin **d'apporter une réponse au problème posé**.
La figure suivante résume l'approche employée :

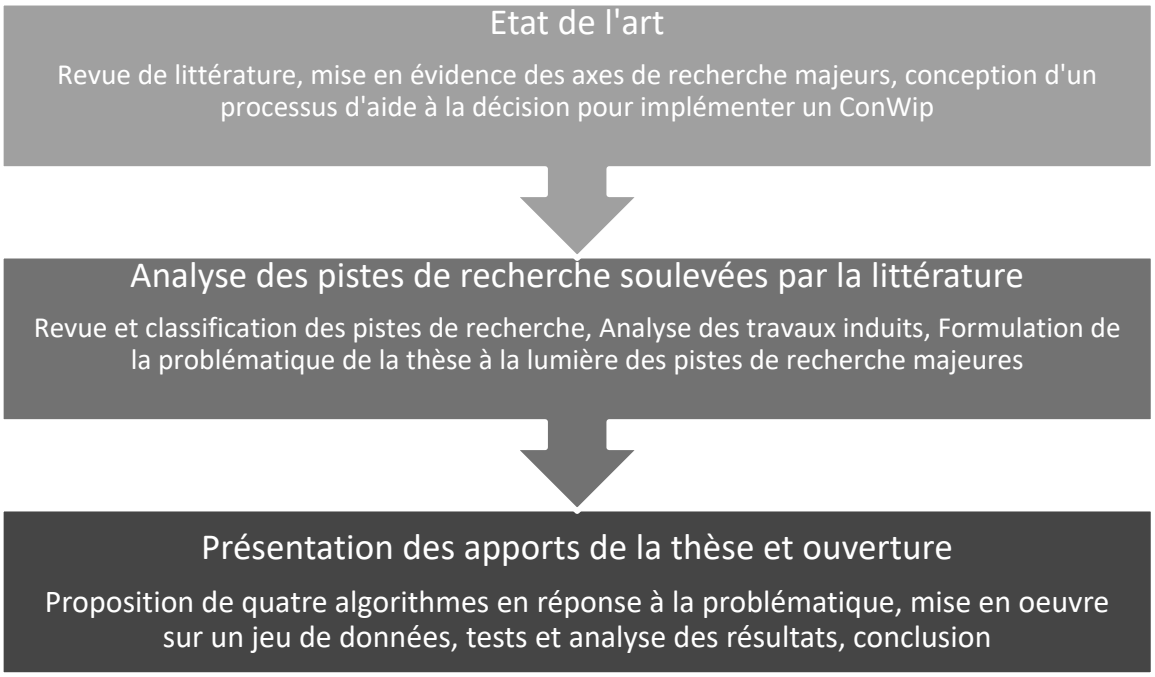

Figure 1. Méthodologie

1.4. STRUCTURE DU DOCUMENT

La figure ci-dessous propose une synthèse schématique du présent rapport qui sera ensuite étayée dans cette section 1.4.

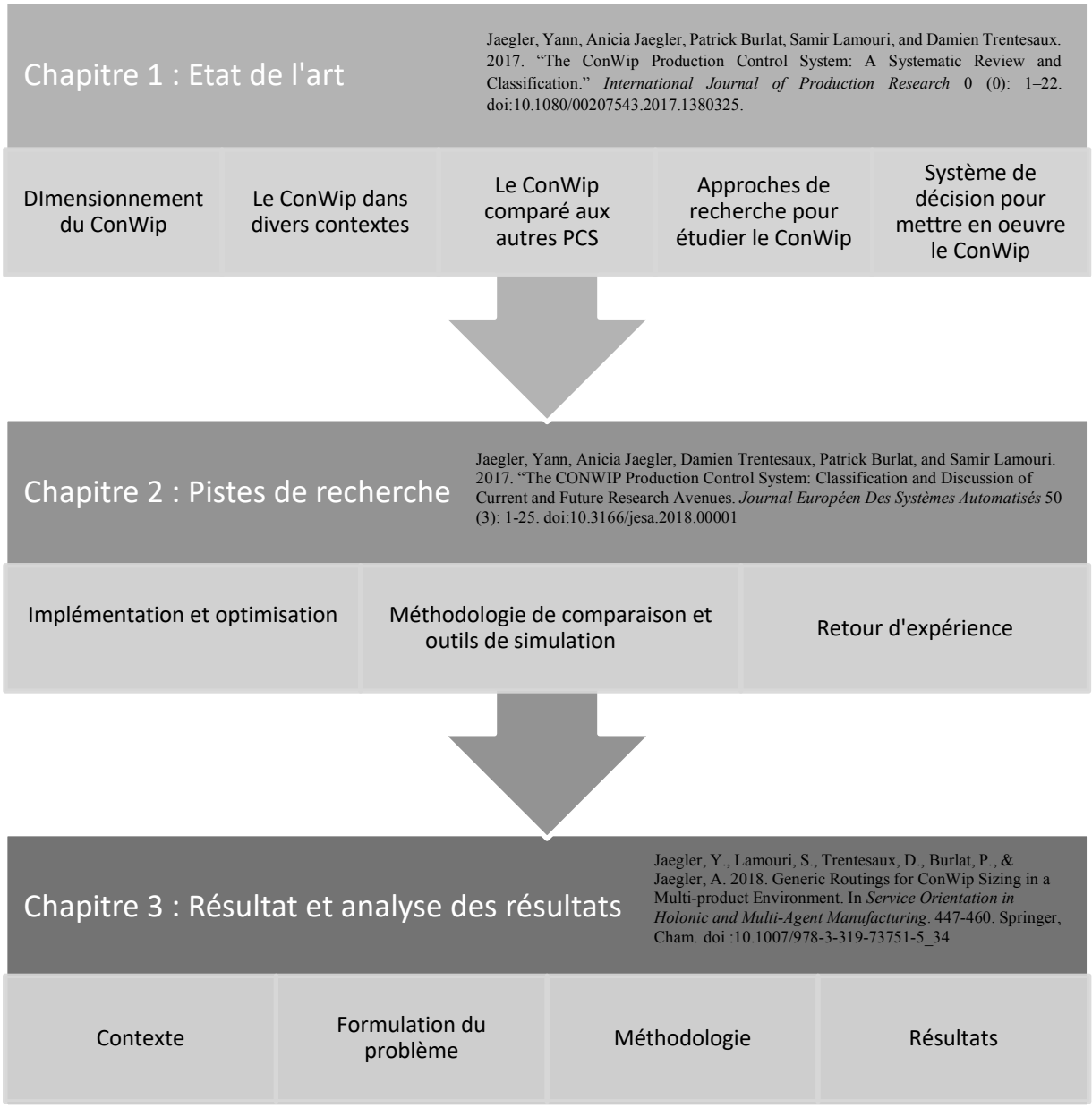

Figure 2. Synoptique de thèse

Le premier chapitre de ce document consiste en **un état de l'art** et permet de définir le périmètre de la thèse. Elle vise notamment à mettre à jour la dernière revue d'état de l'art dédiée au ConWip qui remonte à 2003 ainsi qu'à fournir un guide pour la compréhension du corps bibliographique à travers une méthode de classification originale. L'angle de lecture adopté amène à classer les différentes publications selon trois axes, ceux qui :

- s'intéressent au dimensionnement d'un ConWip,
- se focalisent sur la performance et le contexte dans lequel est implémenté le ConWip,
- proposent une comparaison entre le ConWip et d'autres PCS.

En plus de fournir une clé pour interpréter les approches de recherche, les critères considérés répondent aux questions suivantes : comment mettre en œuvre et optimiser un ConWip ?, pourquoi et quand utiliser un ConWip ? Enfin, les pistes de recherche les plus pertinentes sont mises en évidence pour fournir de nouvelles perspectives de recherche.

Le deuxième chapitre de cette thèse est consacré à un **recensement des perspectives de recherche** proposées par les articles revus au sein de la partie précédente. Son triple objectif consiste à classer ces axes de recherche suivant un prisme pertinent, 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.

Le troisième chapitre traite de la question clé de **l'optimisation du ConWip dans un environnement caractérisé par un mix produit élevé et/ou un mix de gammes opératoires élevé**. Quatre algorithmes qui permettent, à partir d'un jeu de gammes opératoires, de générer une gamme « moyenne » appelée ici « gamme enveloppe », sont présentés. Ces gammes enveloppes sont ensuite implémentées dans Wipsim, un outil d'ingénierie utilisé dans les projets pour concevoir et améliorer les lignes d'assemblage pilotées par un ConWip, ce qui permet de calculer les paramètres ConWip optimisés pour chacune de ces gammes. Un échantillon de données, issues d'un cas industriel, est utilisé pour tester les quatre modèles obtenus. Nous les comparons sur le plan de leur sensibilité aux variations de mix produit et à l'introduction de différents produits atypiques. Nos expériences montrent d'une part que nos algorithmes génèrent des gammes enveloppes viables et d'autres parts fournissent des éléments permettant de choisir entre les quatre solutions proposées en fonction du contexte.

La thèse se termine par **une conclusion et une discussion autour de perspectives de recherches futures**.

2 ETAT DE L'ART

2.1. Méthodologie de recherche
2.2. Dimensionnement du ConWip
2.3. Le système ConWip dans divers contextes
2.4. Le ConWip comparé aux autres PCS
2.5. Approches de recherche et typologie des modèles utilisés dans les études sur le ConWip
2.6. Système de décision et de mise en œuvre du ConWip

Au cours de la dernière décennie, un nombre croissant de publications ont étudié le système de contrôle de production (PCS) CONstant Work In Progress (CONWIP). Compte tenu des défis industriels actuels, tels que la nécessité de s'adapter, la personnalisation croissante des produits, la diminution des délais et l'importance grandissante de la qualité du service rendu aux clients, le ConWip semble être un PCS efficace et agile pour les industriels. Cette partie vise à mettre à jour la dernière revue d'état de l'art dédiée au ConWip qui remonte à 2003 ainsi qu'à fournir un guide pour la compréhension du corps bibliographique à travers une méthode de classification originale. L'angle de lecture adopté amène à classer les différents papiers selon trois axes : ceux qui s'intéressent au dimensionnement d'un ConWip, ceux qui se focalisent sur la performance et le contexte dans lequel est implémenté le ConWip et ceux qui proposent une comparaison entre le ConWip et d'autres PCS. En plus de fournir une clé pour interpréter les approches de recherche, les critères considérés répondent à des questions sur la façon de mettre en œuvre, comment optimiser, pourquoi et quand utiliser le ConWip. Enfin, les pistes de recherche les plus pertinentes sont mises en évidence pour fournir de futures lignes de recherche.

2.1. METHODOLOGIE DE RECHERCHE

La satisfaction client est un facteur dont l'ampleur est croissante dans l'évaluation de la compétitivité industrielle. Par conséquent, la variété des produits proposés, la capacité à afficher et à tenir des délais de livraison à la fois courts et fiables figurent parmi les trois principales attentes des clients.

Dans ce contexte, l'efficacité du système de contrôle de production (PCS) choisi par un industriel constitue un élément clé de son succès. En effet, un PCS efficace permet aux chaînes de production de livrer le bon produit au bon moment et à un coût maîtrisé. Parmi les PCS existants, le « Constant Work in Progress (ConWip) » a été décrit pour la première fois par Spearman, Woodruff et Hopp (1990) comme une alternative au Kanban. En effet, sur la base du mécanisme élémentaire identifié par Jackson (1963), Spearman, Woodruff et Hopp (1990) ont ouvert la voie à la définition et à la mise en œuvre du ConWip en décrivant toute sa méthodologie.

D'une manière générale, l'objectif principal du ConWip est de contrôler la quantité totale de l'encours sur l'environnement considéré (le ConWip est principalement utilisé sur les lignes de production) en le gardant constant. Il trouve ses racines théoriques dans la Loi de Little (Little 1961) :

« Le volume d'encours est égal au temps de traversée multiplié par le débit de la ligne de production ».

Les références à produire et les quantités associées sont déterminées par des ordres de fabrication et peuvent être issues d'un système MRP. Le ConWip prend ensuite la main afin de gérer la quantité d'encours. Avant qu'une commande ne soit envoyée à la ligne de production, elle doit être associée à un ticket correspondant à une « autorisation de produire ».

Dans le cas où tous les tickets disponibles sont déjà associés à des ordres de fabrication, toute nouvelle commande doit attendre au début de la chaîne de montage. L'achèvement d'une commande à la fin de la ligne libère le ticket associé qui devient alors disponible pour une nouvelle commande. L'ensemble du processus est illustré par la figure 3.

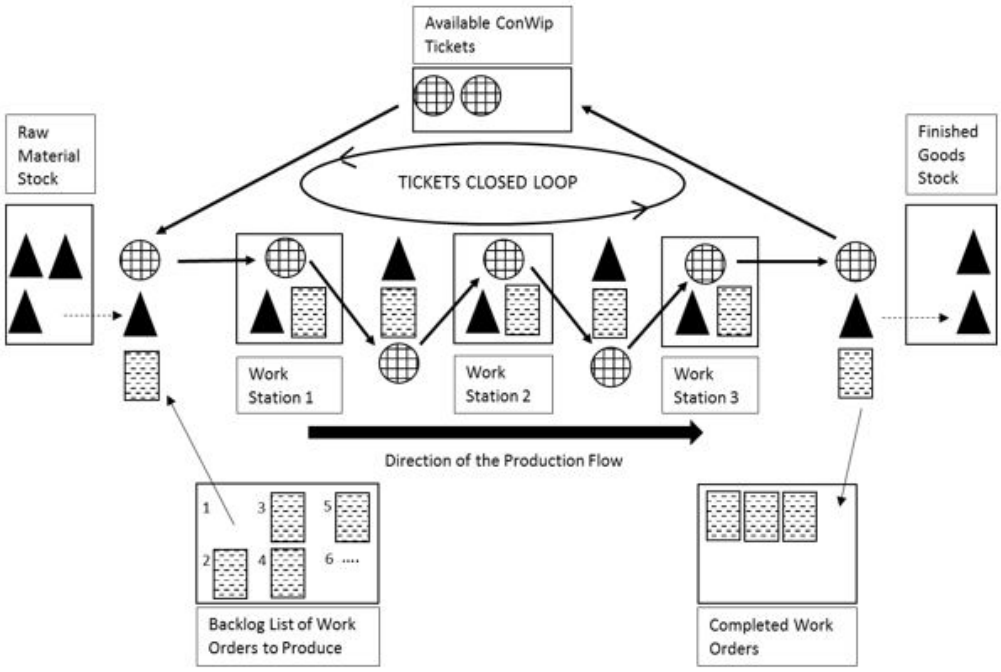

Figure 3. Principe du ConWip

À cette époque, les premiers systèmes en flux tirés pilotés grâce à un Kanban ont commencé à produire des résultats significatifs, notamment concernant la réduction des encours et des temps de traversée (durée entre le début et la fin de la fabrication d'un produit) dans différents environnements de fabrication. Néanmoins, comme l'a souligné Hall (1981), le Kanban a été conçu pour des systèmes de fabrication répétitifs et stables. Dans ce contexte, Spearman, Woodruff et Hopp (1990) ont défini le ConWip dans l'objectif de fournir un PCS plus flexible et plus efficace pour un large éventail d'environnements de fabrication, en particulier ceux caractérisés par une grande variété de produits et des changements fréquents de mix produit. Cette approche était très pertinente, comme Child et al. (1991) l'ont expliqué : « managing complexity can significantly improve competitiveness by simultaneously lowering costs, reducing response time and improving customer benefits. »

De plus, MacDuffie, Sethuraman et Fisher (1996) ont démontré le besoin essentiel de piloter efficacement la diversité des produits sans générer un niveau de complexité inutile qui peut avoir une incidence négative sur la productivité et la qualité du travail. Ce chapitre état de l'art propose donc une revue systématique de la littérature sur le ConWip à jour des dernières avancées apportées par les chercheurs (Figure 4).

Pour atteindre cet objectif, un protocole de revue est construit selon la méthodologie employée par Schulze et al. (2016). Les principales sources d'information utilisées pour identifier les articles susceptibles d'être intégrés à cette revue sont les bases de données universitaires suivantes : Elsevier (www.sciencedi rect.com), Emerald (www.emeraldinsight.com), Springer (www.springerlink.com), Wiley (www.wiley.com), EBSCO (www.ebsco.com) et IEEE. Pour identifier les articles, nous définissons trois chaînes différentes pour les recherches :

Search string 1: 'ConWip' (TITLE, KEYWORDS, ABSTRACT) OR 'modified ConWip'(TITLE, KEYWORDS, ABSTRACT) AND YEAR > 2003 AND DOCUMENT TYPE (peer-reviewed) ARTICLE.

Search string 2: 'production control system' (TITLE, KEYWORDS, ABSTRACT) AND 'review' (TITLE) AND YEAR > 2003 AND DOCUMENT TYPE (peer-reviewed) ARTICLE.

Search string 3: 'production control system' (TITLE, KEYWORDS, ABSTRACT) and PUSH (TITLE, KEYWORDS, ABSTRACT) AND PULL (TITLE, KEYWORDS, ABSTRACT) AND YEAR > 2003 AND DOCUMENT TYPE (peer-reviewed) ARTICLE.

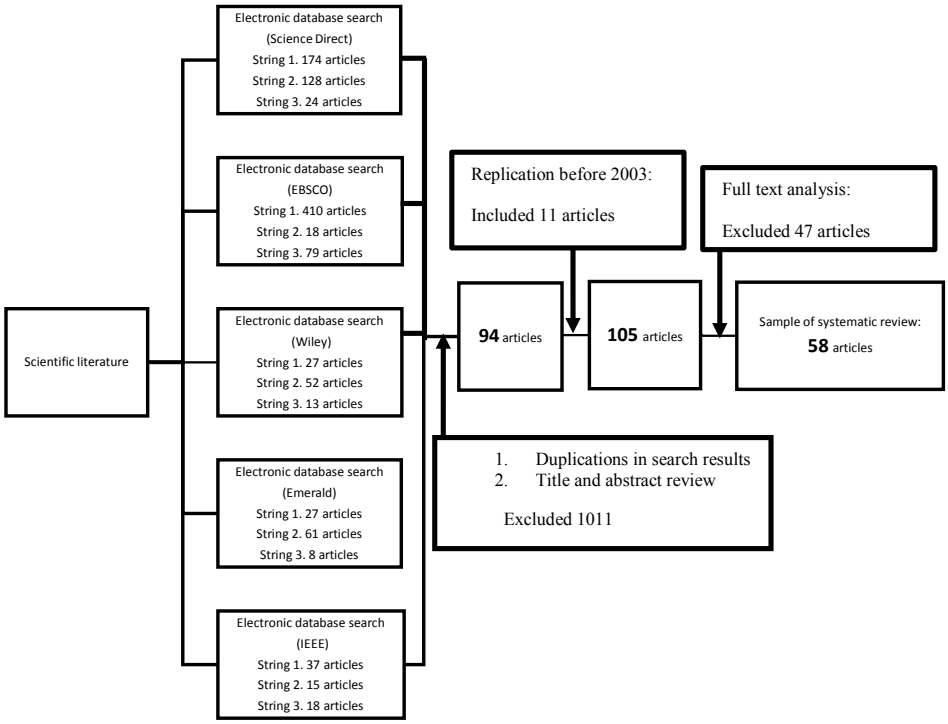

Figure 4. Cartographie de la recherche scientifique à propos du ConWip

Cette méthode a été commentée et mise à l'épreuve par d'autres chercheurs après qu'une étude préliminaire du présent travail ait été présentée lors d'une conférence (Jaegler, Burlat et Lamouri 2016). Les auteurs, en tant qu'évaluateurs indépendants, ont utilisé des résumés et des titres pour évaluer initialement les articles. Pour assurer une couverture complète, la recherche a été réalisée pour la période de 2000 à 2017. 11 articles retenus par Framinan, González et Ruiz-Usano (2003) ont également été ajoutés. Le texte intégral des articles sélectionnés a été extrait et les articles ont été examinés selon quatre caractéristiques.

Comme indiqué, le but de cette partie consiste à mettre à jour la dernière revue de littérature au sujet du ConWip que Framinan, González et Ruiz-Usano (2003) ont réalisée. En effet, depuis 2003, le nombre important d'articles publiés rend une revue systématique de ces études non seulement intéressante, mais presque nécessaire. L'objectif consiste à traiter les apports des nouvelles recherches vis-à-vis des études antérieures, publiées par Framinan, González et Ruiz-Usano (2003).

La synthèse de la revue systématique consiste à classer les recherches au sujet du ConWip selon quatre prismes dont le choix a été motivé par les raisons suivantes :

- Le prisme du dimensionnement a été choisi en référence à Spearman, Woodruff et Hopp (1990), Hopp et Spearman (1991) et Hopp et Roof (1998), qui expliquent qu'un système ConWip peut être dimensionné selon deux caractéristiques principales, le nombre de tickets et la taille de lot,
- Le prisme relatif à l'environnement de production a été choisi en référence à Stevenson, Hendry et Kingsman (2005), qui fournissent une étude fondamentale de la planification et du contrôle de la production. Leur étude met en évidence la distinction fondamentale entre fabrications à la commande (MTO) et fabrication sur stock (MTS) et montre que la configuration de l'atelier est une détermination majeure pour le choix de PCS,
- Le prisme de la comparaison entre les PCS a été choisi en fonction du grand nombre d'articles qui lui sont consacrés et de la valeur ajoutée qu'il apporte à l'évaluation de ConWip en tant que PCS. Les catégories de PCS qui apparaissent dans la section dédiée à ce sujet (système push, Kanban, Hybrid Kanban, Hybrid ConWip, POLCA) ont été déterminées parmi les catégories les plus courantes (divers systèmes Push, Kanban, hybride et extensions de Kanban, hybride et extensions de ConWIP, Polca, Cobacabana, base sur stock, Workload, TOC) comme étant les plus représentatives de la littérature.
- Le prisme de la méthodologie de recherche a quant à lui été retenu pour fournir une synthèse complète des articles examinés dans le cadre des trois angles de vue précédents. Le modèle mathématique, la simulation, la revue de la littérature et le retour d'expérience ont été déterminés comme les méthodologies de recherche les plus représentatives pour l'ensemble de la littérature considérée.

Ces quatre prismes fournissent un guide correspondant à la fois au point de vue des professionnels et des chercheurs. Les trois premiers d'entre eux constituent des supports à l'implémentation du ConWip porteurs de sens pour des professionnels et mettent en évidence les différentes pistes de recherches ouvertes à l'intention des chercheurs. Le dernier vise à aider les chercheurs à choisir la meilleure méthodologie pour leurs futures recherches. Les quatre questions de recherche sous-jacentes sont synthétisées par la figure 5.

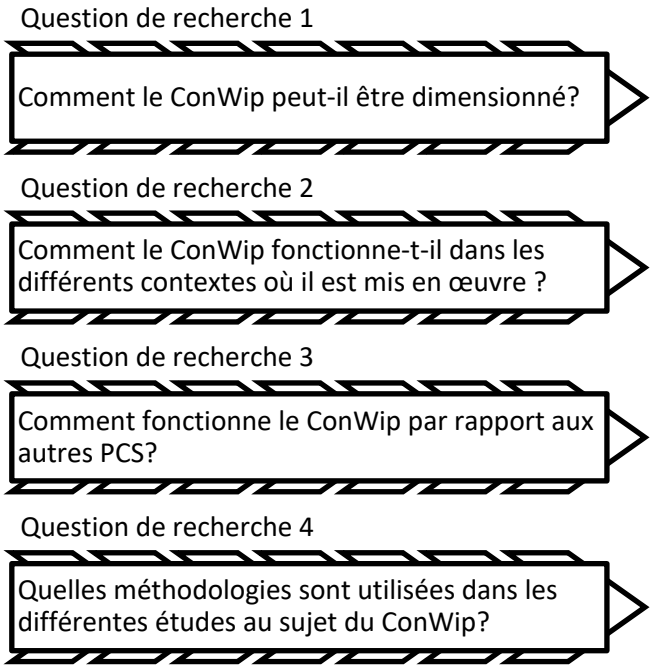

Figure 5. Questions de recherche

Pour répondre à ces quatre questions clés, ce chapitre est structurée comme suit : la section 2 se concentre sur les études de mise en œuvre du ConWip, la section 3 est consacrée aux contextes dans lesquels les contributions au sujet du ConWip ont été réalisées, la section 4 traite de la comparaison des ConWip avec les autres PCS, la section 5 examine les différents modèles et approches utilisés, la section 6 propose un guide de décision et de mise en œuvre pour les professionnels et l'associe à l'analyse documentaire des sections 2 à 5. Enfin, la section 7 conclut et se concentre sur les futures pistes de recherche.

2.2 DIMENSIONNEMENT DU CONWIP

Cette section vise à répondre à la question de recherche 1 : Comment le ConWip peut-il être dimensionné ? Dans ce cadre, elle propose une revue des articles focalisés sur les problèmes de mise en œuvre du ConWip.

Comme l'ont montré différentes études, la mise en œuvre d'un système ConWip est caractérisée par un critère endogène majeur à savoir le dimensionnement et par deux critères endogènes mineurs à savoir le nombre de boucles (Ip et al 2007) et le management visuel (Burlat 2015) mis en œuvre sur la ligne de production. Selon Spearman, Woodruff et Hopp (1990), Hopp et Spearman (1991) et Hopp et Roof (1998), un système ConWip peut être dimensionné selon deux caractéristiques principales : le nombre de tickets et la taille de lot, qui sont supposés aboutir au temps de traversée ou au débit moyen ciblé par le professionnel. Le lien entre ces différents paramètres est illustré par la figure 6.

$$\overbrace{taille\ de\ lot\ \times\ nombre\ total\ de\ tickets}^{\text{Compromis niveau d'en-cours}} = nombre\ d'en-cours$$
$$= MAX\ \{\underbrace{cadence\ moyenne \times temps\ de\ traversée\ moyen}_{\text{Compromis performance}}\}$$

Figure 6. Implémentation d'un ConWip

Les papiers étudiés dans cette section sont synthétisés dans le tableau 1 et classés selon la clé de lecture proposée dans la figure 7.

Tableau 1. Analyse des documents traitant d'un sujet de mise en œuvre

Référence	*Implémentation*		
	Nombre de tickets (NT)/taille de lot (TL)	*Cadence (C)/niveau d'en-cours (EC)/ temps de traversée (TT)*	*Nombre de boucles ConWip (BC)*
(Aglan and Durmusoglu 2015)	*TL*	*TT*	
(Belisário, Azouz, and Pierreval 2015)	*NT*		
(Belisário and Pierreval 2015)	*NT*		
(Bonvik, Dallery, and Gershwin 2000)		*TT*	
(Cao and Chen 2005)	*TL*		
(Economopoulos and Kouikoglou 2008)		*C/EC*	
(Eng and Sin 2013)			*BC*
(Helber, Schimmelpfeng, and Stolletz 2011)		*C/EC*	
(Herer and Shalom 2000)	*NT*	*C/TT*	
(Huang et al. 2015)		*C/EC/TT*	*BC*
(Huang et al. 2017)			*BC*
(Ip et al. 2007)			*BC*
(Jodlbauer and Huber 2008)		*EC*	
(Li 2010)		*C*	

(Marek, Elkins, and Smith 2001)	*NT*		
(Mhada and Malhamé 2011)		*EC*	
(Olaitan, Yu, and Alfnes 2017)		*C*	
(Parvin et al. 2012)		*C*	
(Pergher and Vaccaro 2014)	*NT*	*TT*	
(Pierreval et al. 2013)	*NT*	*EC*	
(Prakash and Chin 2017)			*BC*
(Romagnoli 2015)		*C/TT*	
(Ryan and Vorasayan 2005)	*NT*		
(Sastry and Garg 2017)		*C/EC/TT*	
(Satyam and Krishnamurthy 2013)	*TL*		
(Srinivasan, Ebbing, and Swearingen 2003)		*EC/TT*	
(Tardif and Maaseidvaag 2001)	*NT*		
(Thürer et al. 2017)		*C*	
(Y. Wang, Cao, and Kong 2009)	*NT*	*C*	
(Zhang and Chen 2001)	*TL*		

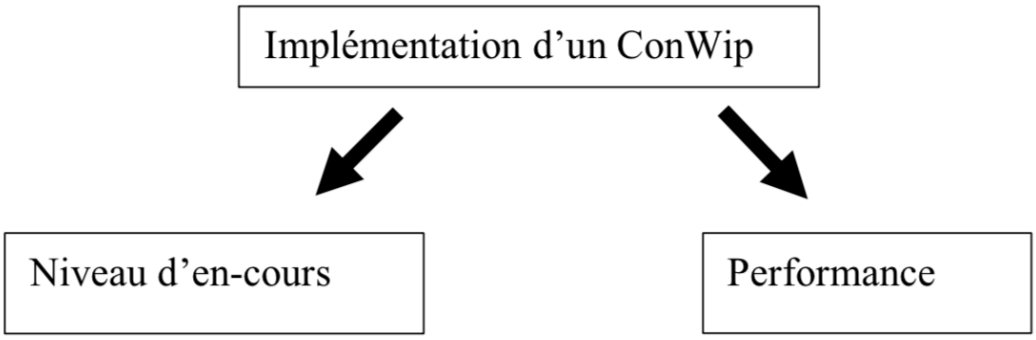

Figure 7. Facteurs d'implémentation d'un ConWip

Cette section se concentrera en un premier temps sur les articles se rapportant au niveau d'encours et ensuite sur ceux traitant de la performance, comme synthétisé dans la Figure 7. La première colonne du tableau 1 indique les articles qui s'intéressent au nombre de tickets et/ou à la taille de lot, la deuxième colonne indique les articles qui s'intéressent au débit de produits, au niveau d'encours et/ou au temps de traversée et la troisième colonne indique les articles qui portent sur le nombre de boucles ConWip à utiliser.

2.2.1. Niveau d'en-cours

Comme illustré par la figure 6, le nombre de tickets détermine la quantité d'encours sur la ligne de production. Comme le démontre la loi de Little, cette quantité est très importante, car un nombre croissant de tickets augmenterait également le délai moyen. En d'autres termes, la définition du nombre de tickets consiste à trouver le meilleur compromis entre le débit (qui induit donc l'efficacité maximale de la ligne de production), la réduction des coûts et le délai moyen, et donc la satisfaction du client et la gestion de la trésorerie.

Pour tirer parti de la colonne 2 du tableau 1 (nombre de tickets [NT]/taille des lots [TL]), il est important de noter que deux approches pour la définition du nombre des tickets sont communément choisies au sein de la littérature : la première considère un dimensionnement statique du nombre de tickets et la seconde s'oriente vers un dimensionnement dynamique.

Un certain nombre d'articles les plus représentatifs de ces deux approches sont cités et contextualisés ci-après. Concernant la première approche, Hopp et Spearman (1996) présentent une formule selon laquelle le débit est directement lié au nombre de tickets et aux caractéristiques du goulet d'étranglement. Cela permet d'estimer le meilleur nombre de tickets, mais il faut pour cela connaître le débit optimal et le taux d'occupation moyen du goulet d'étranglement. Pour compléter ce calcul, Marek et al. (2001) proposent une méthode heuristique de réduction du nombre de tickets afin d'optimiser ce dernier. Pergher et Vaccaro (2014) considèrent que la définition du niveau d'encours est un problème multicritère lié aux politiques de gestion des flux, aux coûts des stocks, à l'impact des arrêts de production liés à la pénurie de matière, au taux de service et à la variabilité des processus de production. Ces auteurs proposent une méthode combinée — simulation par ordinateur et Electre-TRI (méthode de tri à critères multiples) — pour dimensionner l'encours sur les lignes de production gérées par un ConWip.

La seconde approche est moins étudiée, mais fournit des pistes de recherche originales. Hopp et Roof (1998) proposent une méthode qui ajuste automatiquement le nombre de tickets en se basant sur des données en temps réel. Cette méthode, appelée Statistical Throughput Control (STC), vise à atteindre les objectifs de cadence de production en optimisant le nombre de tickets et en conséquence le niveau du WIP. Dans un autre exemple, la variation de la demande, de l'inventaire et des niveaux de commandes en attente sont les trois paramètres que Tardif et Maaseidvaag (2001) utilisent pour déterminer le nombre de tickets autorisés dans le système. Leur étude vise à diffuser les avantages d'un système de production à flux tiré dans des environnements de fabrication à forte variabilité. Belisário et Pierreval (2015) proposent une recherche plus approfondie basée sur le même modèle que Tardif et Maaseidvaag (2001), mais aussi sur un nombre minimum de tickets pouvant être complété par un jeu de tickets supplémentaires. La décision de compléter l'ensemble initial de tickets est prise par l'intermédiaire d'un arbre de décision. L'état initial du système de production représente les données d'entrée de l'arbre tandis que le nombre modifié de tickets est suggéré comme donnée de sortie.

Le dimensionnement de la taille de lot et du nombre de tickets détermine la quantité d'encours sur la ligne de production et, en tant que tel, doit également être considéré comme un moyen d'équilibrer le débit et le temps de traversée moyen. Le temps de changement de séries, en particulier en ce qui concerne les goulets d'étranglement, peut constituer un prisme pertinent pour définir la taille de lot. Cependant, l'ajustement du niveau d'encours par le dimensionnement de la taille de lot a moins été étudié que celui par le nombre de tickets. À notre connaissance, seuls deux articles utilisent ce paramètre. Zhang et Chen (2001) définissent un modèle de programmation mathématique pour calculer la meilleure stratégie de dimensionnement de la taille de lot, Pergher et Vaccaro (2014) optimisent la taille de lot avec une méthodologie de résolution de problèmes multicritère.

2.2.2. Performance

Comme Spearman et al. (1990) l'expliquent, « le niveau d'encours est intrinsèquement plus facile à optimiser que le débit ». Néanmoins, le débit et le temps de traversée moyen font partie des paramètres de performance les plus pertinents d'une ligne de production, comme l'ont indiqué Hallihan et al. (1997). Cela signifie qu'il est essentiel d'en maîtriser les niveaux respectifs. De plus, ces deux indicateurs sont étroitement liés, comme le montre la section 2.2, ce qui implique qu'il est pertinent de les étudier conjointement. Selon la stratégie retenue, un industriel devra faire face à plusieurs situations possibles. Considérant la figure 6, il apparaît que l'augmentation du débit, la réduction des encours et la réduction des délais constituent les trois défis stratégiques différents directement liés à notre sujet. Tous sont discutés ici à travers un exemple ou un environnement dans lequel ils pourraient typiquement prendre place et à travers une recommandation qui est basée sur nos propres expériences et discussions avec des professionnels :

- Dans le cas où le défi stratégique consiste à augmenter le débit, ce qui peut typiquement se produire pour un industriel qui manque de volume pour absorber ses coûts fixes : le choix est rarement d'augmenter les encours, car cela impliquerait un besoin croissant de financement. L'alternative choisie dans ce cas consiste à réduire les délais. Cela peut nécessiter une nouvelle organisation de la chaîne de fabrication, ou au moins quelques améliorations.

- Dans le cas où le défi stratégique consiste à réduire les encours, ce qui peut être illustré par un fabricant qui manque de financement ou qui cherche à dégager de la surface au sol pour de nouvelles activités : le choix ne peut pas se porter sur une réduction du débit, sans quoi la rentabilité serait affectée négativement. L'alternative choisie dans ce cas consiste là aussi à diminuer les délais.
- Dans le cas où le défi stratégique consiste à réduire les délais, ce qui peut être illustré par un industriel positionné sur un marché axé sur le délai (par exemple, un équipementier automobile de rang 1) : la décision pourrait soit se porter sur une augmentation du débit ou sur une diminution du niveau d'encours qui créent tous deux un cercle vertueux. Un industriel choisirait la meilleure option en fonction du défi stratégique secondaire ou en fonction des coûts respectifs des alternatives.

Pour tirer le meilleur parti du tableau 1 — colonne 3 (niveau de rendement [T]/WIP [W]/délai moyen [ALT]), il faut savoir que les articles mentionnés peuvent être divisés en deux catégories puisqu'ils poursuivent généralement deux objectifs distincts. Nous proposons quelques illustrations caractéristiques pour chacune de ces deux catégories.

La première consiste à démontrer dans un environnement donné que le ConWip surpasserait le système actuellement en place en matière de temps de traversée et/ou de débit. Par exemple, Eng et Sin (2013) étudient le ConWip appliqué à l'extrémité d'une ligne d'assemblage de semi-conducteurs. À l'aide d'un modèle de simulation à événements discrets, ils soulignent que le ConWip est capable de réduire considérablement le temps d'écoulement tout en maintenant les performances de débit actuelles. En procédant de la même manière, Romagnoli (2015) simule un « ConWip tiré par le goulet d'étranglement » dans un système de fabrication complexe et démontre sa capacité à réduire considérablement les délais moyens avec une réduction très faible du débit en contrepartie.

Le second objectif consiste à prévoir les performances d'un système ConWip dans un contexte de production déterminé. Herer et Shalom (2000) tentent de prédire la performance d'un système ConWip après avoir déterminé la meilleure quantité d'encours. En particulier, ils se concentrent sur le débit moyen pour mesurer la performance. Hopp et Spearman (1991) utilisent également un modèle de simulation pour prédire les paramètres de sortie d'une ligne de production fonctionnant grâce au ConWip tout en mettant en évidence les performances en matière de débit et de délai moyen.

Pergher et Vaccaro (2014) proposent de se focaliser sur plusieurs indicateurs clés de performance, parmi lesquels le délai et le débit moyen. Sur la base d'une analyse quantitative des données, ils déterminent le meilleur niveau d'encours pour optimiser l'ensemble pondéré d'indicateurs.

2.2.3. Pistes de recherche

Deux pistes de recherche sont identifiées. La première est la détermination du nombre de tickets. Ce sujet constitue la piste de recherche la plus souvent proposée par les auteurs. Ceci est facilement compréhensible car un gain de précision dans ce domaine impliquerait un équilibre optimisé entre le niveau d'encours et le taux de service. En effet, ces deux facteurs de performance sont essentiels en matière de performance économique, ce qui explique la pertinence de cette piste de recherche. Par exemple, un nombre de tickets dynamique ou ajustable en temps réel est opposé à un nombre de tickets statique comme moyen d'optimisation pertinent. Belisario et al. (2015) proposent une analyse centrée sur ce dernier thème, qui permet de mesurer les avantages et les inconvénients de la méthode dynamique. Parmi les pistes de recherche d'optimisation et de mise en œuvre, plusieurs auteurs abordent la question délicate des chaînes de production déséquilibrées (temps de changement de série, goulets d'étranglement et problèmes de débit) impliquant un nombre constant de tickets, mais des niveaux de charge variables (en raison de gammes opératoires hétérogènes). Ce sujet est également une question centrale dans le contexte spécifique d'une « production à la commande » (PAC) et d'une variété de produits élevée.

Plus généralement, cela conduit à étudier la robustesse du CONWIP dans un processus de production caractérisé par des changements de gammes opératoires, des goulets d'étranglement et des conditions variables résultant d'une production bénéficiant d'une approche d'amélioration continue. En prenant en considération le corps de littérature qui s'intéresse au dimensionnement du ConWip, deux pistes de recherche futures peuvent être sélectionnées.

La première serait une évaluation des processus de gestion d'un nombre statique ou variable de tickets. Une telle étude pourrait fournir un cadre de décision pour les professionnels en fonction de leur contexte industriel et de leurs objectifs économiques. Il faudrait tenir compte de deux facteurs pour caractériser le contexte industriel : la variabilité de la charge de production et l'adaptabilité de l'outil de production. L'optimisation de la trésorerie financière et l'optimisation du chiffre d'affaires seraient utilisées comme deux indicateurs économiques différents pour évaluer et finalement comparer les deux processus de gestion des nombres de tickets.

La seconde pourrait consister à étudier l'influence de l'hétérogénéité des gammes opératoires sur les performances du ConWip et proposer une méthodologie pour définir des « gammes moyennes ou gammes enveloppes » pour représenter le mix modèle pris en charge par la ligne de production. La « gamme moyenne » ainsi définie serait utilisée pour dimensionner et implémenter un ConWip dans un contexte de fabrication à la commande. Pour terminer, la comparaison entre différentes « gammes moyennes » potentielles serait également utile pour déterminer la meilleure d'entre elles ou, sans parler d'optimum, une gamme moyenne « représentative » parmi celles possibles. Cette recherche fournirait également des éléments supplémentaires aux décideurs et aiderait à répondre à la question du dimensionnement de la boucle ConWip. Un environnement industriel caractérisé par une haute saisonnalité en matière de « mix-modèle » serait choisi pour tester ces deux pistes de recherche. Ce choix particulier est pertinent, car il introduit l'idée d'un équilibre mobile de la ligne de production (en matière de charge de travail par poste notamment, ce qui induit un goulet d'étranglement mobile). Cette caractéristique fournirait l'opportunité de la mise en place d'un nombre de tickets variable afin d'évaluer les avantages possibles de ce système par opposition au système fonctionnant avec un nombre statique de tickets.

2.3. LE SYSTEME CONWIP DANS DIVERS CONTEXTES

Cette section vise à répondre à la question de recherche 2 : comment fonctionne le ConWip dans les différents contextes où il est mis en œuvre ? Même si le ConWip a été conçu comme une alternative agile aux anciens PCS (Spearman et al., 1990), il est intéressant de noter que la plupart des auteurs considèrent le ConWip comme un PCS adapté à un contexte spécifique.

Cette section a pour but de passer en revue les études qui appréhendent le ConWip dans un environnement industriel caractérisé par son approche « fabrication à la commande ou fabrication sur stock » et par sa configuration d'atelier illustrée à la Figure 8. Ce choix de classification repose sur l'étude fondamentale de la planification et du contrôle de production proposée par Stevenson et Al. (2005). Leur étude explique que la distinction « Fabrication sur stock/Fabrication à la commande » est fondamentale dans la mesure où la configuration « Fabrication sur stock » est significativement plus sensible à la pertinence du choix du PCS. En plus de cela, Stevenson et al. montrent que la configuration de l'atelier est une détermination majeure pour le choix de PCS. Enfin, des articles traitant du ConWip dans des contextes non manufacturiers sont également proposés dans cette partie.

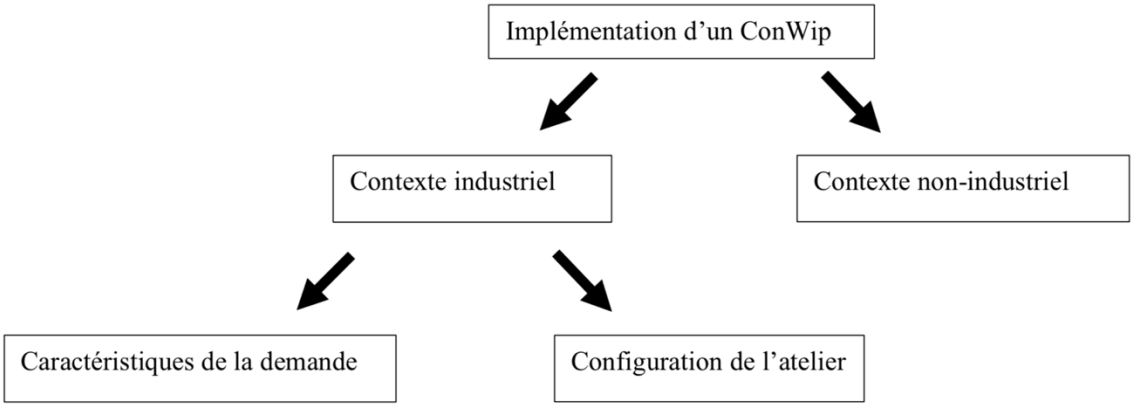

Figure 8. Facteurs liés à l'environnement ConWip

Tableau 2. Analyse des articles traitant de l'environnement industriel dans lequel est implémenté le ConWip

Reference	**Environment**		
	Demand	***Shop Type***	***NI***
Aglan and Durmusoglu 2015		FS/JS	
Bahaji and Kuhl 2008	MTS	FS	
Belisario et al. 2015	MTS		
Bertolini et al. 2015	MTO	JS	
Bonvik et al. 2000	MTS	FS	
Crop et al. 2015			X
Dallasega et al. 2015			X
Economopoulos and Kouikoglou 2008	MTS	FS	
Framinan et al. (2001)		FS	
Germs and Riezebos 2010	MTO		
Harrod and Kanet 2013	MTO	JS	
Helber et al. 2011		FS	
Herer and Shalom 2000		FS	
Huang et al. 2016	MTO	JS	
Huang et al. 2017		FS	
Jodlbauer and Huber 2008		FS	
Korugan and Gupta 2014	MTS		
Lavoie et al. 2010	MTS	FS	
Li 2010		JS	
Mhada and Malhamé 2011	MTS	FS	
Olaitan et al. 2017	MTO	FS	
Onyeocha et al. 2013		FS	
Onyeocha et al. 2015		FS	
Papadopoulou 2013		JS	
Parvin e al. 2012		FS	
Pergher and Vaccaro 2014	MTS	FS	
Prakash and Feng 2011		FS	
Prakash and Chin 2017		FS	
Romagnoli 2015	MTO	JS	
Ryan and Vorasayan 2005	MTS		
Sastry and Gard		FS	
Stevenson et al. 2005	MTO	JS	
Takahashi and Hirotani 2005	MTS		
Tardif and Maaseidvaag 2001	MTS		
Wang et al. 2009	MTS		
Wang et al. 2013	MTS	FS	
Zhang and Chen 2001	MTS	FS	

2.3.1. Caractéristiques de la demande

Cette sous-section vise à mettre en évidence quelques exemples typiques d'études mentionnées dans le tableau 2 — colonne 2 (Demande) afin de contextualiser les articles traitant des caractéristiques « Fabrication sur stock » et « Fabrication à la commande ».

D'une manière générale, on peut affirmer que de nombreux auteurs montrent de l'intérêt pour l'étude du ConWip sous le prisme du contexte « Fabrication sur stock » ou « Fabrication à la commande ». Néanmoins, il convient de noter que le ConWip n'a été associé à la « Fabrication à la commande » qu'après 2010, à l'exception de l'article proposé par Stevenson et al. qui a ouvert la voie en étudiant l'adaptabilité de différents PCS au MTO. Cela illustre le fait que le ConWip a été initialement conçu pour la « Fabrication sur stock » et que les chercheurs ont plus récemment découvert que sa simplicité et son efficacité en font un PCS pertinent pour les contextes de « Fabrication à la commande ». C'est le premier élément saillant qui peut être mis en évidence à travers cette revue. Le second élément traite de l'utilisation plus classique du ConWip dans les contextes « Fabrication sur stock » dans le cadre desquels certains auteurs se sont intéressés à l'idée d'un nombre dynamique de tickets. La présente section met en évidence certains de leurs articles.

Une grande attention a été accordée au sein de la littérature à la mise en œuvre et aux résultats du ConWip dans l'approche de « Fabrication sur stock ». Ryan et Vorasayan (2005) analysent un contexte multiproduit géré par ConWip visant à réduire le nombre de ventes perdues en optimisant le nombre de tickets par type de produit. Cette approche originale est ancrée dans le fait que satisfaire une demande pour un type de produit peut entraîner la perte des ventes d'un autre produit. Pour répondre à cette question, ils proposent un modèle original permettant de définir le nombre optimal de tickets par type de produit afin de minimiser la perte de ventes. Ils montrent en outre que leur modèle permet de réduire la perte de 50 %. Tardif et Maaseidvaag (2001) envisagent également d'ajuster le nombre de tickets et proposent un nombre dynamique de tickets dans la boucle ConWip en fonction notamment du niveau de stock. L'évaluation de ce processus est réalisée sur un seul produit dans un système en une seule étape.

Takahashi et Hirotani (2005) étudient un modèle plus complexe, définissant une chaîne d'assemblage multi étapes avec des délais spécifiques pour chaque étape. Leur article analyse une approche de fabrication sur stock qui permet de considérer l'inventaire des produits finis comme la dernière étape de la boucle ConWip. Dans le même ordre d'idées, Lavoie et al. (2010) démontrent l'efficacité du ConWip dans un contexte de fabrication sur stock dont le taux d'aléas est très fort et non prédictible. Pergher et Vaccaro (2014) proposent quant à eux une approche du ConWip appliqué à la « Fabrication sur stock » et axée sur une méthodologie en 18 étapes pour définir le meilleur niveau de WIP.

Bien que le contexte de « Fabrication à la commande » soit généralement moins étudié, trois articles méritent d'être soulignés. Romagnoli (2015) conçoit une méthodologie pour intégrer et dimensionner le ConWip dans une ligne de production qui produit à la commande avec plusieurs familles de produits. L'accent est mis sur la taille de la boucle ConWip qui commence à partir de la première étape de la ligne de fabrication et se termine au goulet d'étranglement. Harrod et Kanet (2013) considèrent également un système de « Fabrication à la commande » afin de comparer un Kanban, une approche POLCA et un ConWip. Germs et Riezebos (2010) développent la question critique de la capacité à équilibrer la charge sur les postes d'une ligne de fabrication en flux tiré dans un contexte de « Fabrication à la commande » et démontrent comment une approche POLCA et un m-ConWip (un système hybride ConWip qu'ils décrivent dans le même article) peuvent équilibrer la charge.

2.3.2. Configuration de l'atelier

Selon Stevenson et al. (2005) la configuration de l'atelier est une caractéristique majeure à prendre en compte pour le choix d'un PCS. Les deux configurations principales que l'on peut trouver dans la littérature sont la configuration « flowshop » et la configuration « jobshop ». Cette sous-section se concentrera sur ces deux configurations en mettant en évidence les articles les plus marquants mentionnés dans le tableau 2 — colonne 3 (type d'atelier).

De la même façon que pour la distinction « Fabrication sur stock »/« Fabrication à la commande », il semble que Stevenson et al. ont proposé le premier article associant ConWip et jobshop en 2005. Avant cette date, le ConWip était généralement associé aux flowshops. Au cours des dernières années, les auteurs ont accordé un intérêt croissant à l'utilisation du ConWip dans cette configuration d'atelier particulière.

Les chaînes de production Flow Shop ont donc été majoritairement et largement étudiées. Certaines recherches traitant de ce sujet ont déjà été mentionnées, en particulier en ce qui concerne le contexte de fabrication sur stock dans la section précédente. Par exemple, les articles écrits par Pergher et Vaccaro (2014), Ryan et Vorasayan (2005) et Lavoie et al. (2010) entrent dans cette catégorie. Bonvik et al. (1997) et Framinan et al. (2001) étudient quant à eux le cas d'une chaîne de production de 4 machines avec 1 et 2 types de produits respectivement. L'approche de Bonvik et al. (1997) repose sur la comparaison de différents PCS dans cet environnement particulier. Framinan et al. (2001) examinent la séquence qui constitue le carnet de commande dans un flow shop géré par un ConWip. Ils définissent une règle de séquençage facile à utiliser pour les commandes destinées à être produites dans un flow shop.

En ce qui concerne les job shops, outre les articles de Romagnoli (2015) et Harrod et Kanet (2013) précédemment mentionnés dans la sous-section dédiée aux caractéristiques de la demande, il convient de mentionner deux documents importants. L'étude de Ryan et al. (2000) tente de déterminer à l'appui d'une heuristique un niveau fixe d'encours adapté à un job shop modélisé avec plusieurs produits et plusieurs gammes opératoires utilisant la même ressource de production. Li (2010) étudie quant à lui l'impact d'un changement d'implantation de l'atelier, de l'amélioration de la qualité et de la réduction du temps d'installation sur le fonctionnement d'un ConWip. Cette approche montre que l'avantage procuré par un ConWip dans un environnement jobshop dépend du niveau des trois impacts considérés.

2.3.3. Contextes non manufacturiers

Le ConWip appliqué à un contexte non manufacturier constitue également un sujet de recherche pertinent. Deux articles en particulier illustrent cette idée. Dallasega et al. (2015) étudient un cas spécifique d'ingénierie sur commande (ETO) caractérisé par une installation in situ. Ils montrent comment le ConWip peut être utilisé comme un outil de gestion de projet, permettant une meilleure synchronisation entre l'ingénierie, la fabrication et l'installation. La réduction du délai d'exécution du projet est un résultat clé de leur approche. Dans un contexte médical, Crop et al. (2015) appliquent le ConWip au processus de traitement par radiothérapie, démontrant que « gérer l'encours plutôt que de planifier toutes les étapes du processus » permet d'optimiser les délais et d'augmenter le débit dans un environnement non manufacturier.

2.3.4. Pistes de recherche

Une analyse complète des questions soulevées par les articles examinés dans cette section montre que le ConWip a été largement étudié pour les environnements de fabrication les plus simples. En particulier, le ConWip dans les configurations de type flowshop travaillant avec une politique de « Fabrication sur stock » a été très largement questionné et analysé. En plus de cela, il semble que plusieurs auteurs soulèvent la question des environnements caractérisés par une forte variété de produits qui représentent une difficulté pour la mise en œuvre efficace d'un PCS. En synthèse, les pistes de recherche clé concernent les environnements jobshop, les politiques de « Fabrication à la commande » et les contextes à forte variété de produits.
Deux grandes lignes de recherche peuvent être mises en évidence en s'appuyant sur cette revue de littérature et contribueraient à la construction d'un guide d'aide à la décision pour un environnement de fabrication donné.

La première se concentre sur l'adaptation du CONWIP à un environnement de type jobshop, les lignes de production interconnectées ou les réseaux de lignes de production. Cette ligne de recherche serait particulièrement pertinente dans le cas d'une ligne de réparation destinée à réparer des produits issus du service après-vente. En effet, ce type d'environnement est généralement caractérisé par une organisation de type jobshop, chaque ligne utilisant de nombreux outils ou machines différents et potentiellement coûteux, mais peu chargés et donc partagés entre différentes lignes. En plus de cela, ce type d'environnement est promis à une croissante probable à l'avenir dans la perspective du développement de la logistique inverse.

La seconde traite de l'adaptation du CONWIP à la politique de « Fabrication à la commande » et à un contexte caractérisé par un ensemble de gammes opératoires présentant une forte hétérogénité. Cette piste de recherche pourrait trouver un champ d'application dans deux types d'industries distincts. Le premier dans un environnement de sous-traitance industrielle de capacité, car il est typiquement caractérisé par la fabrication à la commande et les produits changeants et vise à fournir des délais de livraison courts. Le second dans l'industrie de la fabrication de machines spéciales, car elle est aussi caractérisée par une fabrication à la commande et des gammes opératoires hétérogènes. De plus, elle vise à se positionner comme une référence en matière de délai de livraison court.

2.4. LE CONWIP COMPARE AUX AUTRES PCS

Le ConWip a été développé à l'origine pour combler certaines faiblesses des anciens PCS (Spearman et al., 1990) et, par conséquent, Framinan et al. (2003) ont pu observer qu'un grand nombre d'articles sont consacrés à la comparaison entre le ConWip et les autres PCS. Cette section se concentre sur ces études et fournit un aperçu de leurs conclusions dans l'objectif d'éclairer les industriels (tableau 3) et de répondre à la question 3 : comment le ConWip se comporte-t-il par rapport aux autres PCS ?

Avant d'entrer dans le détail des articles dédiés aux différentes comparaisons, il est pertinent de souligner l'approche de recherche adoptée par Gonzalez et al. (2011). Leur étude fournit une classification complète des PCS basées sur un système de tickets et montre leurs principales caractéristiques, sans pour autant les comparer dans un contexte spécifique. Elle offre une vue d'ensemble très pertinente et constitue un point d'entrée efficace pour quiconque souhaite comparer le ConWip avec d'autres PCS. Les deux sous-sections suivantes fourniront quelques éléments aux lecteurs dans le but d'optimiser la lecture et la pertinence du tableau 3. En effet, ces éléments mettront en lumière une partie des articles cités pour illustrer les comparaisons les plus pertinentes ou les plus originales.

Tableau 3. Vue d'ensemble des articles impliqués dans une analyse de comparaison

Référence	**ConWip compare à**	**Conclusion**
Bahaji and Kuhl 2008	Push	L'approche en flux poussé est supérieure au ConWip dans toutes les expériences impliquant un mix produit faible et une production à grand volume
Baynat et al. 2001	Kanban/Hybrid Kanban	L'accent est mis sur la méthode de comparaison adaptée aux PCS utilisant des systèmes de tickets, mais aucune comparaison de performance n'est effectuée. La conclusion de cette étude consiste à proposer une nouvelle méthode de comparaison plus rapide et plus générique.
Baynat et al. 2002	Kanban/Hybrid Kanban	La comparaison porte sur le kanban partagé ou dédié. L'étude met en exergue des cas où le choix de dédier ou de partager les tickets est neutre et des cas où ce choix a un impact fort.
Eng and Sin 2013	Push/Modified ConWip	Le ConWip et le ConWip Modifié surpassent le système en flux poussé avec un meilleur contrôle du niveau d'encours et avec une réduction du temps de cycle. Le ConWip Modifié conduit à de meilleurs résultats que le ConWip en matière de temps de cycle et de robustesse.
Germs and Riezebos 2010	Polca/Modified ConWip	Polca, ConWip et ConWip Modifié peuvent tous les trois réduire à la fois le temps de traversée total (yc le temps de traitement) et le temps de cycle moyen (ie temps dans l'atelier). Les trois PCS montrent des avantages respectifs différents en fonction des conditions de fabrication.
Gong et al. 2014	Push/Kanban	Le ConWip a besoin de la plus petite quantité d'informations et induit le délai le plus court
Gonzalez et al. 2011	An overview of the token-based PCSs	Il semble que déterminer quel est le meilleur type de PCS dans chaque type d'environnement reste assez difficile et nécessite plus d'efforts de recherche, mais aussi de retour d'expérience avec implantation réelle dans l'industrie

Harrod and Kanet 2013	Kanban/Polca	Le ConWip est le meilleur choix dans un contexte de fabrication à la commande
Jodlbauer and Huber 2008	Push/Kanban	Le ConWip surpasse le Kanban et MRP seul accompagné d'un flux poussé en matière de taux de service, d'encours et de facilité d'optimisation, mais montre des faiblesses en matière de stabilité de fonctionnement
Korugan and Gupta 2014	Hybrid Kanban	Le Kanban hybride est dominant en matière de temps de traversée moyen et de niveau de commandes en attente
Land 2009	Cobabacana	Discussion au sujet des PCS basés sur les tickets pour le contrôle des ateliers de type jobshop sans conclusion en matière de surperformance de l'un ou de l'autre
Lavoie et al. 2010	Kanban/Hybrid Kanban	Pour une production conduisant à la fabrication d'une seule référence produite, le Kanban Hybride surperforme le ConWip et le Kanban lorsque l'espace de stockage et les coûts d'inventaire sont pris en compte. Le ConWip est équivalent au Kanban Hybride si les deux coûts sont considérés de manière agrégée. Le ConWip est dépassé par le Kanban si le nombre de postes de travail et les coûts d'espace de stockage augmentent
Li 2010	Push	Dans un environnement de type jobshop, le ConWip surpasse le Kanban
Marek et al. 2001	Push/Kanban	Le système ConWip est plus facile à implémenter et à ajuster que le système Kanban
Onyeocha et al. 2013	Modified ConWip	Dans un environnement de fabrication multiproduit, le ConWip modifié surpasse le Kanban
Onyeocha et al. 2015	Hybrid Kanban	La comparaison de deux ConWip modifiés dans un environnement de fabrication multiproduit conduit à la conclusion suivante : l'un des deux ressorts comme étant la meilleure stratégie lorsque la minimisation de l'encours total moyen pour un taux de service cible est la priorité.
Prakash and Chin 2015	Modified ConWip	Le ConWip est comparé à 15 ConWip modifiés grâce à un système de classification qui offre un aperçu de la façon dont ces systèmes modifient les caractéristiques majeures pour influencer les performances
Prakash and Feng 2011	Push/Kanban/Modified ConWip	Le flux poussé est supérieur en matière de débit, le ConWip modifié (parallèle) est supérieur en matière de temps de traversée et d'utilisation des goulets d'étranglement et le ConWip est supérieur en matière de taux de service.
Sastry and Garg 2017	Kanban/Hybrid Kanban	La performance du Kanban hybride est optimale par rapport au Kanban et au ConWip. Le Kanban hybride a été mis en place pour un mois ce qui a permis d'augmenter le volume de production de 54%.
Stevenson et al. 2005	Push/Kanban/Polca	Ce document fournit une matrice de sélection des PCSs en fonction des conditions de fabrication
Suri and Krishnamurthy 2003	Polca	L'avantage du système Polca par rapport aux autres PCS est démontré en matière d'efficacité et de satisfaction des employés.
Takahashi and Hirotani 2005	Push/Kanban/Modified ConWip	Le ConWip modifié surclasse le Kanban et le ConWip en matière d'inventaire d'autant plus que la priorité est accordée au niveau d'inventaire global (par opposition au niveau d'inventaire local sur un ou quelques postes de travail), mais le Kanban et le ConWip se révèlent meilleurs que le ConWip modifié lorsqu'une priorité plus élevée est accordée à la dernière station d'inventaire
Takahashi and Nakamura 2002	Kanban/Modified ConWip	Le système ConWip réactif est moins efficace pour réagir aux instabilités de la demande que le Kanban réactif
Thürer et al. 2014	Cobacabana	Pas de comparaison de performance, mais une discussion autour du potentiel de Copacabana à contrôler la libération des

		ordres de fabrication via les tickets de manière plus efficace que le ConWip
Wang et al. 2009	Hybrid ConWip	Le ConWip hybride améliore la productivité et réduit les retards de production par rapport au ConWip classique
Ziengs et al. 2012	Polca	La capacité de POLCA à équilibrer la charge de travail sur l'aval de la ligne apporte une contribution supérieure à celle de la capacité du ConWip à équilibrer la charge de travail au moment de la libération des tickets.

La première sous-section est dédiée aux comparaisons entre le ConWip et les différents systèmes à flux poussé ou tiré. La seconde sous-section est conçue pour mettre en évidence les comparaisons entre d'une part le ConWip et les « Hybrides de ConWip » et d'autre part le ConWip et le système POLCA. Ce choix de comparaison s'explique, car ces PCS sont tous basés sur des unités de charge avec des points communs forts qui donnent un intérêt particulier à leurs comparaisons (Germs et Riezebos 2010).

2.4.1. Le ConWip comparé aux PCS à flux poussé ou à flux tiré

De manière générale, le corps de littérature présente plusieurs tendances différentes et notables. La première consiste à dire que les systèmes à flux poussé n'ont généralement d'intérêt que dans des environnements très simples caractérisés par un mix produit très étroit et un volume élevé. La seconde consiste à dire que le ConWip n'est pas systématiquement le meilleur PCS pour les environnements complexes, mais est plus facile à implémenter, à utiliser et à maintenir. La troisième tendance soutien le fait que le ConWip est particulièrement efficace dans les environnements de fabrication caractérisés par de petites séries de production. Pour approfondir ce sujet et entrer dans les détails de cette section, il est intéressant de préciser que la comparaison la plus fréquente se fait entre les systèmes ConWip, Kanban et flux poussé basique. Le Kanban est un système à flux tiré qui suit la philosophie du « Juste à temps » (JIT). L'utilisation de produits/sous-ensembles par des ateliers ou des postes de travail situés en aval autorise et induit le démarrage du processus de fabrication des produits/sous-ensembles utilisés et ainsi de suite tout au long de la chaîne de production. Cette façon de gérer se poursuit en amont jusqu'à la commande de matières premières. Le système utilise des tickets entre les différents ateliers. Le nombre de tickets détermine le niveau d'encours.

Spearman et Zazanis (1992) ont proposé le premier travail de recherche dans ce cadre. À l'aide d'un modèle analytique, ils montrent que le ConWip surpasse le Kanban et un MRP seul en matière de stabilité et de réduction des encours, d'efficacité du processus de fabrication et d'agilité. Takahashi et Hirotani (2005) poursuivent le même objectif en se concentrant sur des chaînes d'approvisionnement complexes. La contribution supplémentaire de leur article tient dans l'introduction d'un ConWip « synchronisé ». Le ConWip synchronisé a été conçu pour gérer des chaînes d'approvisionnements caractérisées par des étapes d'assemblage avec des délais différents. En plus de la règle habituelle utilisée par le ConWip originel, l'autorisation à produire est conditionnée ici non seulement à la disponibilité d'un ticket, mais aussi à l'ajustement du délai d'assemblage envisagé afin que les commandes validées et traitées puissent être synchronisées lors de leur assemblage. Cette étude montre dans quels cas le Kanban, le ConWip ou le ConWip synchronisé s'imposent comme le meilleur choix.

Pour compléter ces éléments, Prakash et Feng (2011) introduisent la notion de taux de panne machine, en comparant le système push, le ConWip et le ConWip parallèle sous cette contrainte supplémentaire. Ici, le ConWip parallèle est conçu pour gérer séparément les produits récurrents et les produits plus marginaux. Pour effectuer cette gestion séparée, deux jeux de tickets ConWip sont utilisés : le premier est dédié aux produits récurrents et le second aux produits marginaux. De cette manière, deux ConWips fonctionnent en même temps sur la ligne de production. Leurs paramètres de performance choisis sont le niveau d'encours, le temps de traversée moyen, le débit et le taux d'utilisation des goulets d'étranglement, les résultats exprimés par ces indicateurs montrent la pertinence de sélectionner un PCS plutôt qu'un autre. Deux contributions originales dans ce domaine incluent l'outil de modélisation et de comparaison de Marek et al. (2001). La première en tant que tutoriel pour comparer le Kanban et le ConWip et pour soulever quelques questions sur les systèmes push et pull. La deuxième, menée par Gong et al. (2014) considère le PCS comme une « organisation de traitement de l'information (IPO) » et compare le ConWip, le Kanban et le MRP seul dans ce contexte. Cet article conclut avec la supériorité du ConWip — suivie du Kanban — sur un MRP seul en matière d'entropie de l'information, de quantité d'information et de temps de prise de décision.

Le second type de comparaison concerne les « Kanban Hybrides » et le ConWip. Baynat et al. (2001) proposent une modélisation des réseaux et files d'attente pour analyser et évaluer les performances des PCS de type Kanban. Baynat et al. (2002) mettent en évidence les avantages et les inconvénients de ces PCS dans un contexte multiproduit utilisant des tickets partagés ou dédiés. Bonvik et al. (1997) considèrent la question pertinente de la typologie de la demande, en comparant le Kanban, le Kanban Hybride et le ConWip en matière de niveau de service et de niveau de stock. Leur étude est menée dans un environnement spécifique et sous deux types de politiques de la demande : dans le cas d'une demande constante, le Kanban offre les meilleurs résultats tandis que le ConWip et le Kanban Hybride performent avec des demandes dont l'instabilité ou l'évolutivité est élevée. Korugan et Gupta (2014) prennent également en compte la nature de la demande en comparant le Kanban statique au Kanban dit adaptatif. Lavoie et al. (2010) suivent une méthodologie originale, en optimisant les PCS qu'ils traitent (Kanban, Hybrid-Kanban, ConWip) avant de les comparer et de répondre ainsi aux limites des études de comparaison de Framinan et al. (2003).

Pour conclure cette sous-section, il est intéressant de noter que Onyeocha et al. (2013) utilisent la même approche d'optimisation-comparaison que Lavoie et al. (2010) couplée avec une caractérisation de tickets soit partagés soit dédiés similaire à celle introduite par Baynat et al. (2002).

2.4.2. Le ConWip comparé au ConWip Modifié et au système POLCA

Au cours de la dernière décennie, certains systèmes ConWip modifiés ont été développés et comparés au concept original. Comme nous l'avons vu dans la section 2.4.1, Takahashi et Hirotani (2005) définissent un ConWip synchronisé (SPW) dont l'objectif consiste à gommer certains déficits du ConWip lorsque cela est nécessaire pour gérer des chaînes d'approvisionnement complexes. Prakash et Feng (2011) présentent le ConWip Parallèle (PCW). Leur article montre la supériorité du PCW dans le cadre d'une production dont la capacité à gérer un mix produit très large est l'enjeu prépondérant. Cette démonstration est faite en utilisant une approche duale entre produits récurrents et produits marginaux.

Onyeaocha et al. (2013) ont également développé un système ConWip modifié appelé Basestock-Kanban-ConWip (BKCW) basé sur trois paramètres de contrôle : chaque étape de la chaîne de production est contrôlée par deux paramètres tandis que le système entier est contrôlé par un troisième. Leur article démontre la supériorité de BKCW sur les autres PCS de type ConWip. Il est important de noter ici l'existence de la revue effectuée par Prakash et Chin (2015) dans le but de classer 15 systèmes ConWip modifiés en fonction des attributs principaux du système ConWip d'origine.

À ce stade, il est également primordial de se référer plus largement à Suri (1998) qui a proposé un PCS appelé système POLCA. Ce système POLCA repose sur un jeu de tickets qui fonctionnent en boucles superposées avec la notion d'autorisation à produire. Il s'agit d'un système hybride flux tiré-flux poussé basé sur la technologie Quick Response Manufacturing (QRM). Un atelier est divisé en cellules de travail. Des tickets de type tickets Kanban sont utilisés, mais ils circulent entre les cellules de travail.

L'objectif consiste à gérer des productions très variées ou personnalisées. Harrod et Kanet (2013) fournissent une comparaison entre le ConWip, le système POLCA et le Kanban. Ils démontrent que tous les trois réduisent le niveau d'encours de l'atelier. Une des originalités de leur étude repose sur la thèse soutenant le fait que le choix de la façon de gérer les files d'attente est prépondérant sur le choix d'un des trois PCS en jeu ici. Dans la même veine, Germs et Riezebos (2010) comparent ConWip, POLCA et ConWip modifié sous le prisme du contrôle de l'équilibrage de la charge de travail.

2.4.3. Les pistes de recherche

En ce qui concerne la comparaison entre les PCS, le principal axe de recherche porte sur une méthodologie de comparaison et un cadre de comparaison. Par exemple, toute comparaison entre deux PCS doit être effectuée en utilisant une configuration optimale de chacun d'entre eux. Comment est-il possible de s'assurer que cette condition est remplie ? Pour compléter ce concept, identifier les paramètres qui influencent le niveau d'adaptation du PCS à son contexte et le distinguer du niveau de performance représente une autre piste de recherche intéressante.

Le niveau d'adaptation est déterminé par des paramètres structurels, y compris le type d'atelier (jobshop / flowshop), la gamme de produits à fabriquer ou l'hétérogénéité entre les gammes de produits à fabriquer. Ces paramètres doivent être différenciés des éléments qui affectent le dimensionnement, comme le nombre de tickets ou le dimensionnement des lots.
Une étude spécifique peut également être menée pour déterminer quelles caractéristiques intrinsèques d'usine ou d'atelier (configurations, goulets d'étranglement, exigences du processus d'assemblage, etc.) affectent le choix de PCS. Toute réponse à cette piste de recherche permettrait de construire une méthodologie de comparaison non biaisée, qui n'a toujours pas émergé dans la littérature existante. Dans le cas où un tel résultat devenait disponible, il occuperait sans aucun doute une place centrale dans le processus de prise de décision des industriels, car il fournirait un cadre nouveau dans lequel comparer les PCS sans biais.

2.5. APPROCHES DE RECHERCHE ET TYPOLOGIE DES MODELES UTILISES DANS LES ETUDES SUR LE CONWIP

Cette section est consacrée à la réponse à la question de recherche 4 : quelles méthodologies sont utilisées dans les différentes études consacrées au ConWip ? D'après les articles cités dans cette section (Tableau 4), la simulation est l'approche de recherche la plus fréquemment utilisée, les modèles mathématiques viennent en deuxième rang, trois articles décrivent de nouvelles méthodologies, six articles utilisent des retours d'expériences industrielles et trois sont axés sur la volonté de réaliser un état de l'art.

2.5.1. Simulation

Le tableau 4 fournit une synthèse des documents référencés qui sont basés sur la simulation. Les articles basés sur la simulation sont synthétisés à travers leurs variables de simulation et leurs résultats expérimentaux.

Tableau 4. Présentation des documents référencés utilisant des techniques de simulation

Références	Approche de recherche	Variables de simulation	Résultats
Bahaji and Kuhl 2008	Simulation	Fiabilité du respect des délais de livraison - Taux d'utilisation machine - Temps opératoire	L'approche en flux poussé est supérieure au ConWip dans toutes les expériences impliquant un mix produit faible et une production à grand volume
Belisario et al. 2015	Simulation	Idem Tardif and Maaseidvaag 2001	La réduction des coûts est obtenue grâce à un nombre considérable de changements de tickets, ce qui peut entraîner une instabilité du système. Ceci illustre le fait que, lors de la mise en œuvre d'un système ConWIP adaptatif, les industriels doivent soigneusement prendre en considération les conséquences de la modification du nombre de tickets.
Belisário and Pierreval 2015	Simulation (+Genetic Programming)	Idem Tardif and Maaseidvaag 2001	L'approche de programmation génétique basée sur la simulation proposée génère une logique de décision qui spécifie dans quelles circonstances il est favorable de modifier le nombre de tickets.
Bertolini et al. 2015	Simulation	Intervalle entre deux lancements - Temps opératoire - Temps de changement de série - Taux d'utilisation des postes de travail - Mix produit moyen	Les simulations de trois systèmes de contrôle de charge de travail, y compris le ConWip, montrent de très bons résultats par rapport à un système à flux poussé en matière de réduction de l'encours et de conformité à la date de livraison prévue, en particulier dans des environnements productifs hautement contraints
Eng and Sin 2013	Simulation	Temps opératoire - Temps de changement de série - Temps de panne	Le ConWip et le ConWip modifiés performent un système à flux poussé en contrôlant le niveau d'encours et en réduisant le temps de cycle et le temps de traitement. Le ConWip modifié est plus performant que le ConWip en matière de temps de cycle et de robustesse
Germs and Riezebos 2010	Simulation	Temps opératoire - Distribution des temps d'arrivée des commandes - Taille de lot	Le système Polca, le ConWip et le ConWip modifié peuvent tous réduire le temps opératoire total et le temps de traversée moyen. Les trois PCS montrent des avantages respectifs qui se manifestent selon les conditions de fabrication.
Harrod and Kanet 2013	Simulation	Nombre total de tickets	Le ConWip est le meilleur choix dans un contexte de fabrication à la commande
Helber et al. 2011	Simulation	Goulet d'étranglement - Variabilité des temps opératoires – Capacités des stocks intermédiaires	Cet article conduit à une optimisation de la configuration pour maximiser le taux de production et/ou le profit à court terme
Herer and Shalom 2000	Simulation	Temps opératoires - Nombre de tickets	Cet article montre qu'une méthodologie avec un nombre de tickets non entier permet aux modèles d'être utilisés de manière plus fluide et d'obtenir des résultats meilleurs d'un point de vue économique
Huang et al. 2015	Simulation	Taille de lot - Temps de changement de série	La simulation montre que la configuration multi boucles est meilleure que celle à boucle simple dans un système piloté par ConWip.
Huang et al. 2016	Simulation	Politiques ConWip	Le résultat de la simulation implique que (i) la politique alternative de CONWIP proposée a le potentiel de faire face à plus de fluctuations dans l'environnement de production considéré (ii) une

			meilleure conception de la politique de CONWIP permet d'améliorer les performances du système dans la pratique et (iii) la structure des boucles peut être considérée comme un paramètre du ConWip.
Jodlbauer and Huber 2008	Simulation	Temps moyen de réparation – Temps de changement de série - Disponibilité des machines - Taux de rebut - Coefficient de variation de la demande	Le ConWip surpasse le Kanban et le MRP seul pour le taux de service, le niveau d'encours et la facilité d'optimisation, mais montre des faiblesses en matière de stabilité
Lavoie et al. 2010	Simulation	Temps moyen entre deux pannes - Temps moyen de réparation - Productivité par machine - Coût de du stock	Pour une production de type pièce unitaire, le Kanban hybride surperforme le ConWip et le Kanban lorsque l'espace de stockage et les coûts d'inventaire sont pris en compte. Le ConWip est équivalent au Kanban Hybride si les deux coûts sont agrégés. Le ConWip est performé par le Kanban si le nombre de postes de travail et les coûts de stockage augmentent.
Li 2010	Simulation	Temps de changement de série - Temps opératoires - Temps de réparation - Temps de réinitialisation - Temps d'inspection	Dans un environnement de type jobshop, le ConWip est plus performant que le Kanban
Marek et al. 2001	Simulation	Nombre de tickets – Attribution des tickets	Les systèmes ConWip sont plus faciles à implémenter et à ajuster que les systèmes Kanban
Onyeocha et al. 2013	Simulation	Temps opératoires - Temps moyen entre deux pannes - Délai moyen de réparation - Changements dans le mix produit	Dans un environnement de fabrication multiproduit, le ConWip modifié surpasse le Kanban
Onyeocha et al. 2015	Simulation	Temps opératoires - Temps moyen entre-deux pannes - Délai moyen de réparation	Une comparaison documentée de deux ConWip modifiés dans un environnement de fabrication multiproduit est présentée dans cet article
Pierreval et al. 2013	Simulation	Idem Tardif and Maaseidvaag 2001	L'approche de simulation présentée et basée sur l'optimisation de la simulation permet de définir les paramètres qui influencent les performances du système
Prakash and Feng 2011	Simulation	Taille de lot - Ratio entre les produits récurrents (PR) et marginaux (PM) – Taux de panne - Nombre de tickets pour PR et pour PM	Le flux poussé se montre supérieur en matière de débit, le ConWip modifié (parallèle) en matière de temps de traversée et d'utilisation des goulets d'étranglement et le ConWip en matière de taux de service.
Ryan and Vorasayan 2005	Simulation	Nombre de produits - Nombre total de tickets - Temps opératoire moyen - Taux de demande moyen	Détermination de la meilleure allocation des tickets (au sein d'un ensemble total de tickets, fixe) aux différents types de produits afin de minimiser les ventes perdues
Sastry and Gard 2017	Simulation	Taux de demande - Taux de panne	La performance du Kanban hybride est optimale par rapport à celle du Kanban et du ConWip. Le Kanban hybride a été mis en place pour un mois et la production a augmenté de 54%.
Takahashi and Hirotani 2005	Simulation	Stock disponible pour chaque référence - Quantité commandée pour chaque référence -	Le ConWip modifié surpasse le Kanban et le ConWip en matière de niveau de stock la priorité d'optimisation doit être donnée conjointement à plusieurs zones de stock, mais le Kanban et le

		Quantité produite pour chaque référence - Niveau des commandes en retard pour chaque référence - Niveau de la demande pour chaque produit fini - Niveau de la demande satisfaite pour chaque produit fini - Niveau du retard pour chaque produit fini – En-cours total pondéré	ConWip conduisent à un meilleur résultat que le ConWip modifié lorsque la priorité est donnée à la zone de stock aval
Takahashi and Nakamura 2002	Simulation	Temps moyen d'arrivée entre deux commandes	Le système ConWip réactif est moins efficace pour réagir à des changements instables de la demande que le système Kanban réactif
Tardif and Maaseidvaag 2001	Simulation	Nombre de tickets - Nombre de tickets supplémentaires disponibles - Seuil de libération des tickets - Seuil de « capture » des tickets	Evaluation d'un système adaptatif (le nombre de tickets est autorisé à changer) par rapport à un système traditionnel avec un nombre fixe de tickets
Wang et al. 2009	Simulation	Nombre de tickets	Le ConWip hybride améliore la productivité et réduit le taux de retard par rapport au ConWip
Wang et al. 2013	Simulation	Niveau de la demande - Dimensionnement des stocks tampons	Les résultats de la simulation montrent que le problème du goulet d'étranglement ou de la rupture de charge sur de la ligne de production peut être résolu en définissant un nombre de tickets et un stock tampon pour chaque « zone goulet d'étranglement ».
Ziengs et al. 2012	Simulation	Taille de lot - Taux d'utilisation - Distributions des temps d'arrivée et des temps opératoires	La capacité du système POLCA à équilibrer la charge de travail pour l'amont de la ligne surpasse celle du ConWip

2.5.2. Modèles mathématiques

Le tableau 5 fournit une synthèse des articles référencés qui sont basés sur des modèles mathématiques. Les articles basés sur des méthodes mathématiques sont synthétisés à travers leurs paramètres et leurs objectifs.

Tableau 5. Vue d'ensemble des documents référencés utilisant des modèles mathématiques

Références	Approche de recherche	Objectifs	Paramètres
Aglan and Durmusoglu 2015	Modèle mathématique	Appliquer simultanément le fractionnement des lots et le ConWip à travers un modèle mathématique qui est comparé à une production par lot en flux poussé.	Nombre maximum de sous-lots - Nombre de tickets ConWip - Taille de lot – Temps de changement - Temps de transfert fixes et variables - Temps opératoires - Temps de réglage dépendant de la séquence de production
Baynat et al. 2001	Modèle mathématique	Amélioration d'un algorithme original pour fournir un cadre général destiné à l'analyse de systèmes Kanban plus généraux	Nombre d'étapes - Nombre de tickets - Taux de livraison à l'heure
Baynat et al. 2002	Modèle mathématique	Fournir une analyse approfondie des mécanismes de contrôle résultants des configurations avec tickets dédiées et avec tickets partagés	Type de tickets : dédié ou partagé
Bonvik et al. 2000	Modèle mathématique	Construire un algorithme itératif pour déterminer les valeurs des paramètres du « bloc modèle » utilisé et estimer les mesures de performance du système	Taux de réparation - Taux de défaillance - Capacités de stockage – Paramètres du ConWip - Rendement machines
Cao and Chen 2005	Modèle mathématique	Déterminer simultanément l'affectation optimale des composants, la séquence de production et la taille des lots en résolvant le problème « des deux vendeurs itinérants ».	Coût pondéré associé au temps d'arrêt de la ligne - Coût pondéré associé aux temps totaux de changement de séries - Délai de livraison prévu – Temps opératoires - Temps de changement de séries
Economopoulos and Kouikoglou 2008	Modèle mathématique	Déterminer le niveau des paramètres ConWip et la typologie du carnet de commande en attente qui maximisent le taux de profit moyen du système.	Profil de la demande - Coût unitaire de possession du produit - Coût de possession des matières premières
Gong et al. 2014	Modèle mathématique	Le ConWip nécessite la plus petite quantité d'informations et induit les délais les plus courts	Probabilité de la présence d'un produit sur un poste de travail - Quantité de produits dans le système - Nombre de postes de travail
Korugan and Gupta 2014	Modèle mathématique	Comparez le contrôle adaptatif du nombre de tickets au meilleur contrôle statique de nombre de tickets statiques	Coûts unitaires de possession d'un produit dans un nouveau système de fabrication, dans un système de réparation de produits et dans un stock de produits finis - Taux moyen de traitement d'une pièce neuve pour une machine
Mhada and Malhamé 2011	Modèle mathématique /Simulation	Déterminer les estimations de performance (en matière d'encours total moyen, de probabilité de disponibilité des pièces dans le stock final de la boucle) pour les lignes de	Taux de production maximum - Taux de réparation - Taux de défaillance – Capacité de stockage maximum

		transfert non homogènes et non fiabilisées	
Parvin e al. 2012	Modèle mathématique	Développer une méthodologie pour utiliser le modèle de formation croisée des opérateurs dans les lignes ConWip implantées en « U «	Temps moyens de traitement - Nombre de postes partagés pour lesquels un opérateur donné est formé - Nombre de postes fixes pour lesquels un opérateur donné est formé - Nombre de postes sur une ligne - Nombre d'opérateurs sur une ligne
Satyam and Krishnamurthy 2013	Modèle mathématique / Simulation	Obtenir des estimations des principales mesures de performance telles que le débit et la taille moyenne des files d'attente pour un système multiproduit contrôlé par un ConWip	Nombre de tickets - Taux de service - Temps moyen entre deux arrivées de matières premières
Zhang and Chen 2001	Modèle mathématique	Déterminer une séquence de production et des tailles de lots optimales dans une ligne de production ConWip	Coût associé au temps de changement de série - Coût associé aux mauvais équilibrages de charge entre les lots de production - Capacité du goulet d'étranglement - Demande - Temps opératoire - Temps de changement de série sur le goulet d'étranglement

2.5.3. Retours d'Expériences (Rex) et revue de littérature

Le tableau 6 fournit une synthèse des documents référencés qui réalisent une revue de la littérature ou s'appuient sur un retour d'expérience. La revue de la littérature réalisée par Stevenson et al. n'est pas centrée uniquement sur le ConWip, mais plus généralement sur les PCS, celui proposé par Prakash et Chin se concentre sur les systèmes de type ConWip modifié et celui proposé par Framinan et al. est entièrement axé sur le ConWip.

Tableau 6. Aperçu des documents de référence axés sur des Rex ou revues de la littérature

Références	**Approche de recherche**
Crop et al. 2015	Rex non manufacturier
Dallasega et al. 2015	Description de la méthode/ Rex non manufacturier
Framinan et al. 2003	Revue de littérature
Gastermann et al. 2014	Rex industriel
Ip et al. 2007	Rex industriel/ Simulation
Pergher and Vaccaro 2014 FS	Rex industriel / Simulation
Prakash and Chin 2015	Revue de littérature
Romagnoli 2015 JS	Rex industriel / Simulation
Srinivasan et al. 2003	Rex industriel
Stevenson et al. 2005	Revue de littérature
Suri and Krishnamurthy 2003	Description de la méthode/ Rex industriel

2.5.4. Les pistes de recherche

Il n'est pas surprenant que la majorité des études entreprennent des simulations, car cette approche permet de comparer deux systèmes dans les mêmes conditions, alors que les modèles mathématiques sont plus susceptibles de contribuer à définir un nouveau concept. L'étude du ConWip dans des contextes variés devrait également impliquer des applications industrielles, mais les études basées sur les retours d'expériences industrielles en relation avec le ConWip restent relativement rares et constituent donc une piste de recherche future pertinente. Elles pourraient fournir une validation opérationnelle de la simulation ou des résultats des modèles mathématiques. De plus, de telles études pourraient également permettre aux auteurs d'affiner leurs modèles en fonction des résultats expérimentaux. En outre, elles pourraient contribuer à vérifier si la gestion du nombre de tickets variables (qui était couverte par la section 2) est trop complexe ou non pour être appliquée en grandeur réelle dans un atelier ou une usine.

2.6. SYSTEME DE DECISION ET DE MISE EN ŒUVRE DU CONWIP

Les quatre sections précédentes ont fourni des réponses aux quatre questions de recherche qui forment la colonne vertébrale de ce chapitre à travers une revue systématique et une classification de la littérature traitant du système de contrôle de production ConWip :

- Question de recherche 1 : Comment le ConWip peut-il être dimensionné ?
- Question de recherche 2 : Comment le ConWip fonctionne-t-il dans les différents contextes où il est mis en œuvre ?
- Question de recherche 3 : Comment fonctionne le ConWip par rapport aux autres PCS?
- Question de recherche 4 : Quelles méthodologies sont utilisées dans les différentes études au sujet du ConWip ?

Ces quatre questions et leurs réponses fournies par la littérature peuvent être reliées entre elles pour construire un guide d'implémentation du ConWip. Dans ce contexte, la présente sous-section propose un processus de décision et de mise en œuvre : que devrait faire un industriel s'il envisageait de mettre en œuvre un ConWip ? Cette sous-section évoque également des implications managériales de l'état de l'art sur le ConWip.

Cette section se fixe un double objectif. Le premier consiste à d'aider les industriels qui cherchent à implémenter un ConWip. Le second est de fournir un guide de mise en œuvre qui tirera le meilleur parti de cette revue de la littérature en reliant ce processus aux différentes sections de ce chapitre, et par extension, à tous les articles qui ont été examinés dans cette section.

La première étape du processus de prise de décision proposé consiste à analyser un environnement de production. Une liste non exhaustive de caractéristiques pour effectuer cette analyse contiendrait la nature du mix produit, la typologie de la demande (stabilité, prévisibilité, fabrication à la commande, fabrication sur stock), le type d'atelier (jobshop, flowhop) et les risques liés à l'environnement étudié (type, fréquence). Puisque cette question ne fait pas partie de l'objectif de la présente revue de la littérature, elle ne sera pas discutée ici. A notre connaissance, ce sujet spécifique mériterait une recherche dédiée liée au cadre de comparaison général que Framinan et al. (2003) soulignent comme étant un réel besoin.

Compte tenu du résultat de cette analyse, la seconde étape du processus consiste à vérifier le niveau de compatibilité du ConWip avec cet environnement de production : le ConWip est-il adapté à l'environnement ? Les industriels peuvent se référer aux sections 2.3 et 2.4 pour cette étape. En effet, la section 2 .3 fournit des conseils et des références sur la compatibilité du ConWip avec un contexte donné et la section 2.4 fournit des indications et des références sur une comparaison de ConWip avec d'autres PCS. En d'autres termes, la section 2.3 aide à se construire une opinion dans l'absolu et la section 2.4 aide à construire une opinion relative sur le ConWip.

Si la seconde étape du processus débouche sur une conclusion positive pour l'adaptation du ConWip à l'environnement donné, l'étape suivante consistera alors à déterminer les meilleurs paramètres pour le ConWip. La section 2.3 pourra dans ce cas aider les industriels à résoudre ce problème en utilisant son contenu ou en se référant aux documents qu'elle mentionne.

Une fois les meilleurs paramètres déterminés, le processus se poursuit avec une étape de prévision des performances. Cette étape est rendue nécessaire par le caractère stratégique de la décision de mise en œuvre d'un PCS (Jodlbauer et Huber 2008). La section 2.5 fournit quelques éléments clés pour trouver la bonne façon de prévoir les performances futures. En effet, les outils de simulation et dans une moindre mesure les modèles mathématiques tentent généralement de prédire le comportement d'un PCS donné dans un environnement donné aussi précisément que possible.

La dernière étape concerne le pilotage du ConWip en production et se prolonge par une boucle d'amélioration continue, qui se développe autour d'une courbe d'apprentissage. L'expérience croissante acquise en utilisant le PCS mis en œuvre sur le terrain fournira un retour d'expérience interne qui pourra être utilisé pour affiner la conception du PCS et/ou son dimensionnement et sa mise en œuvre.

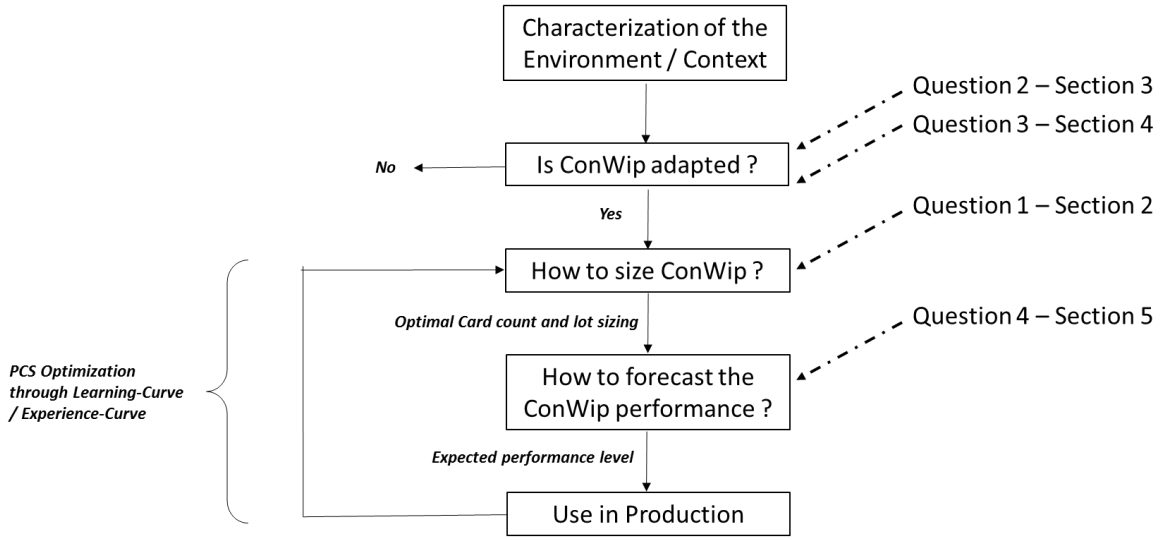

Figure 9. Schéma de prise de décision et de mise en œuvre du ConWip

Pour conclure cette section, il est utile de mentionner de manière synthétique les avantages du ConWip qui apparaissent dans l'ensemble de la littérature pour encourager les professionnels à le sélectionner parmi l'ensemble des PCS. Huang (2016) donne un aperçu complet de ces avantages :

- le CONWIP a une structure simple et est facile à comprendre et à utiliser,
- comparé à d'autres PCS, le ConWip a, d'une manière générale, une performance au moins égale et leur est supérieur sur certains aspects (par exemple un débit élevé, un temps de traversé court et un faible niveau d'encours),
- le système ConWip est plus adapté à la production portée par une politique de fabrication à la commande qu'un système Kanban (Prakash et Chin 2015),
- le ConWip est un PCS qui permet un temps de réaction très court dans la prise de décisions,
- le ConWip confère un avantage sur le taux de livraisons à l'heure (en moyenne et en écart type) par rapport au Kanban et au système POLCA dans un contexte de fabrication à la commande (Harrod et Kanet 2013).

Synthèse du chapitre 2

Ce chapitre visait à proposer une revue de la littérature dédiée au ConWip et à l'analyser avec un angle de vue original. Cet angle de vue a été inspiré par Stevenson et al. (2005) et soulève quatre questions de recherche. Une sous-section spécifique a été consacrée à chacune de ces quatre questions, avec un accent particulier sur leurs perspectives connexes. Une section supplémentaire a été inclue pour proposer un système de décision et de mise en œuvre lié aux quatre questions de recherche. Cette conclusion souligne nos points de vue sur les principales pistes de recherche qui peuvent être tirées de cette revue de la littérature.

(1) Comment le ConWip peut-il être dimensionné ?

Compte tenu du marché mondialisé actuel et des comportements de consommation connexes, les fabricants doivent répondre et même anticiper les attentes des clients qui se trouvent être de plus en plus volatiles. Compte tenu de cette tendance, Stevenson et al. (2005) indiquent que la fabrication à la commande peut être considérée comme l'avenir de la production industrielle. Lorsque l'on considère le corps de la littérature, la question du dimensionnement du ConWip pour une ligne de production pilotée selon le principe de fabrication à la commande et non équilibrée en matière de charge de travail par poste, apparaît comme une question centrale et représente l'une des voies de recherche les plus pertinentes pour répondre à cette première question. En outre, l'opposition entre le nombre statique de tickets et le nombre dynamique de tickets doit également être explorée davantage, car aucune décision claire ne peut être prise en raison de l'équilibre des perspectives dans la littérature.

(2) Comment le ConWip fonctionne-t-il dans différents contextes de mise en œuvre ?

Ounnar et Pujo (2012) montrent que les jobshops efficaces et flexibles en matière d'implantation sont adaptés à la demande croissante de produits personnalisés et même spécifiques. Néanmoins, la majeure partie de la littérature consacrée au ConWip dédie son attention à la production dans des flowshops avec un contexte de fabrication sur stock. Prakash et Chin (2015) expliquent que le ConWip a été « conçu à l'origine pour la fabrication avec des gammes de produits constantes, des temps de fabrication homogènes, des temps de changement de série faibles et des processus de fabrication linéaires ». Cependant, comme indiqué ici, peu de travaux de recherche démontrent la capacité du ConWip à gérer efficacement une fabrication à la commande au sein d'atelier de type job shop. Compte tenu de la faible attention accordée à ce sujet spécifique, le traitement du ConWip dans un atelier de type job shop supportant une politique de fabrication à la commande constitue autre une voie de recherche pertinente.

(3) Comment le ConWip fonctionne-t-il par rapport aux autres PCS ?

Les outils de décision pour un meilleur choix de PCS dans un contexte donné constituent un réel besoin opérationnel. Cependant, le ConWip a été largement comparé à tous les PCS existants et ces études fournissent une base de données pertinente et complète pour choisir entre les PCS existants. C'est la raison pour laquelle ces comparaisons ne constituent pas une piste de recherche prioritaire à notre avis.

(4) Quelles méthodologies sont utilisées dans les différentes études sur le ConWip ?

La section 2.5 de ce chapitre met en évidence le manque d'études consacrées à des retours d'expériences industriels au sujet du ConWip. Par conséquent, l'étude du ConWip dans un contexte de production appliqué pourrait constituer un axe de recherche intéressant. À travers les quatre questions de recherche soulevées par la présente revue, il semble que la recherche sur le ConWip reste pertinente et n'a pas été complètement explorée. En outre, certaines pistes de recherche pourraient amener à la conclusion que le ConWip est le meilleur PCS pour gérer certains environnements industriels typiques à l'avenir.

3. ÉTUDE DES PISTES DE RECHERCHE

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.

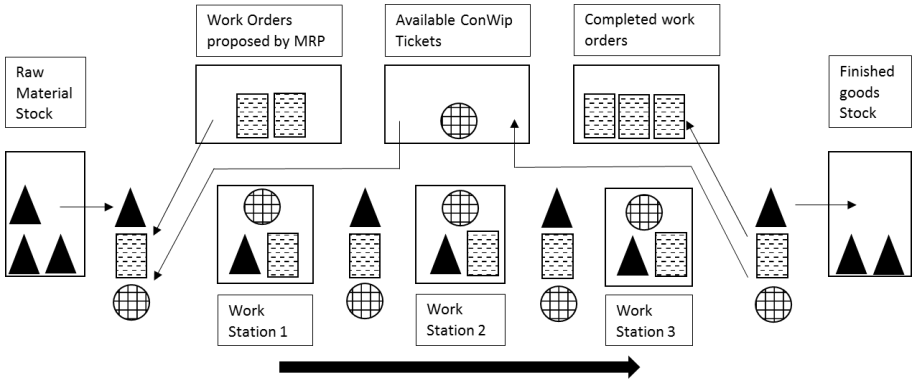

Figure 10. Fondamentaux du ConWip

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

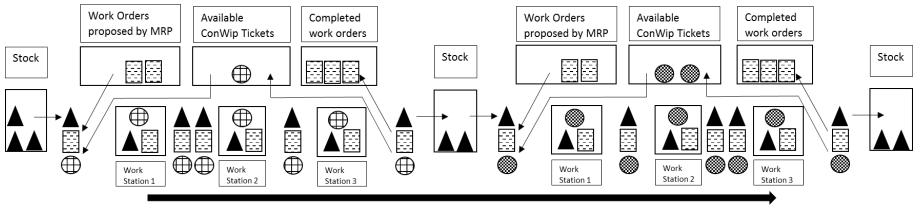

Figure 11. ConWip multiboucle (2)

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.

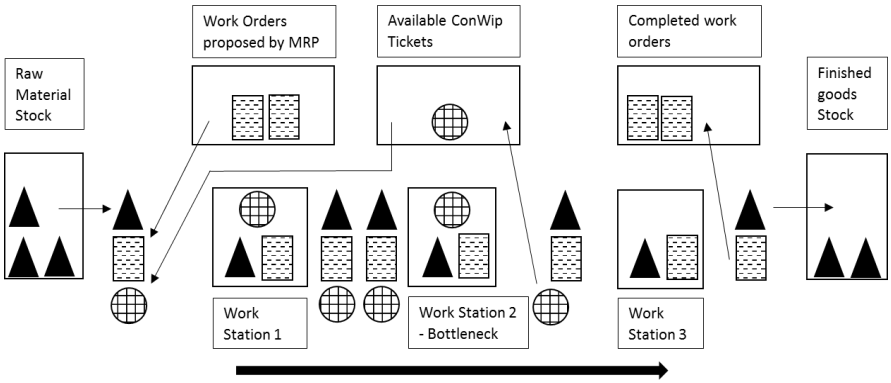

Figure 12. ConWip raccourci pour prendre en compte le goulet d'étranglement.

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.

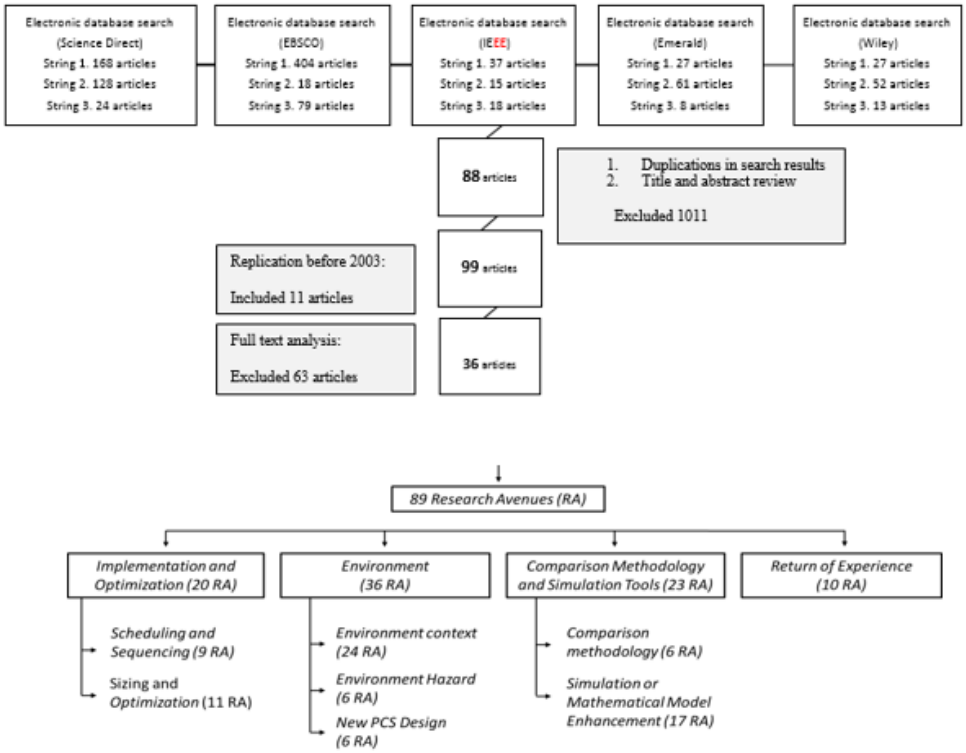

Figure 13. Méthodologie de sélection et de classification des pistes de recherche

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 séquencement 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 séquencement 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 seul est fermée. Takahashi et Hirotani (2005) se réfèrent à Spearman (1990) et étudient la manière d'ordonnancer le carnet de commandes afin d'assurer une capacité adéquate.

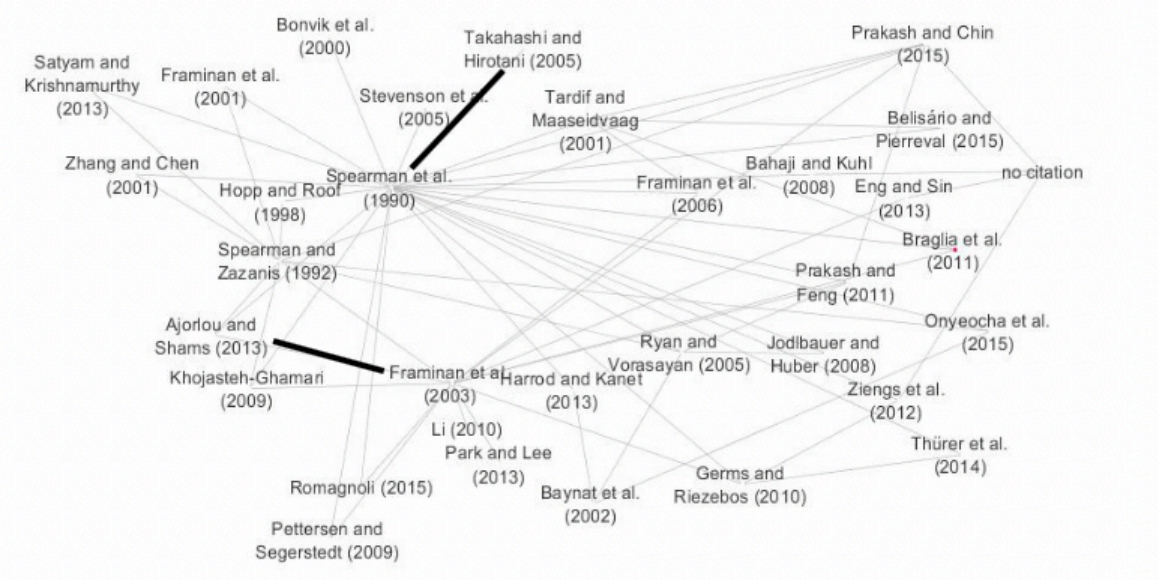

Figure 14. Citations des papiers DO-OS

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 Hirotani (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 Hirotani (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
Germs 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 Hirotani (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 Hirotani (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.

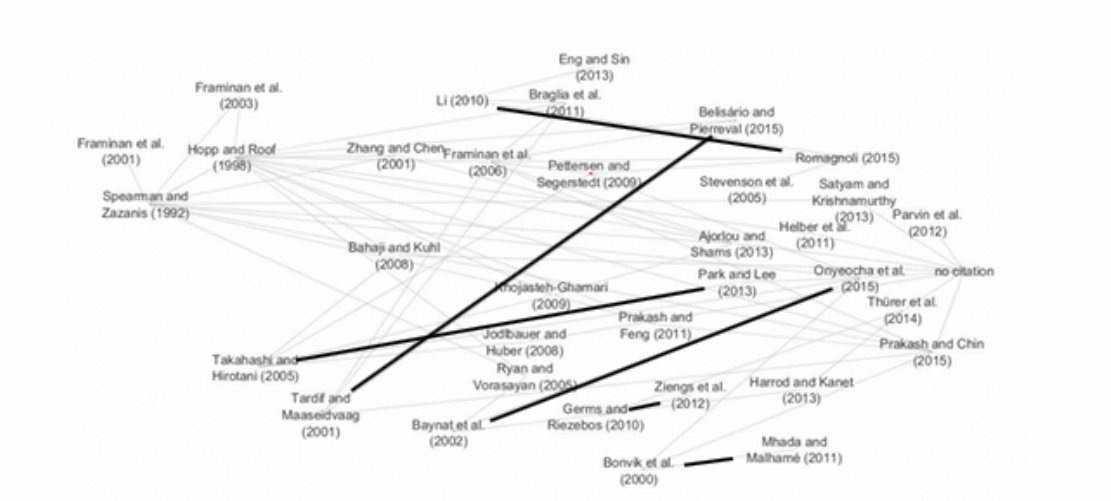

Figure 15. Citations des articles C-V-FI

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 dont 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

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 – Méthodologies 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.

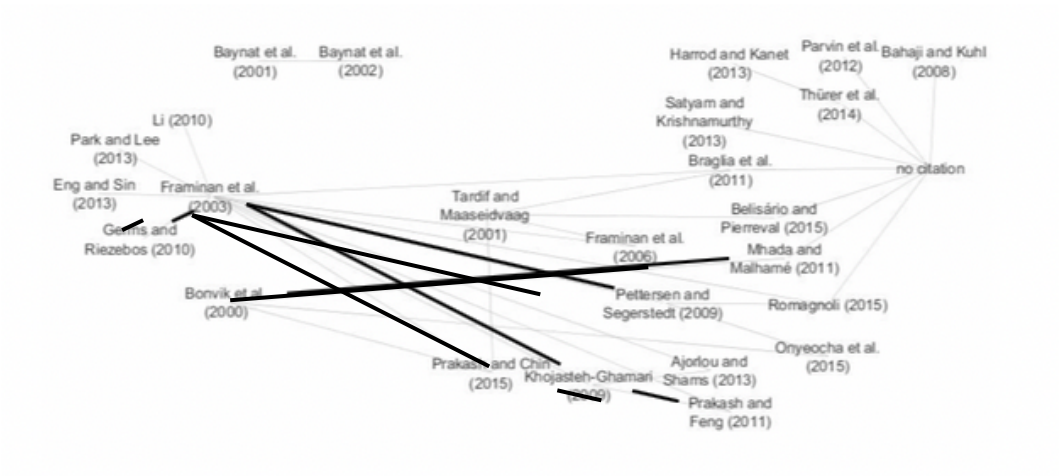

Figure 16. Citations des articles CM-SMM par tous les articles étudiés

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.

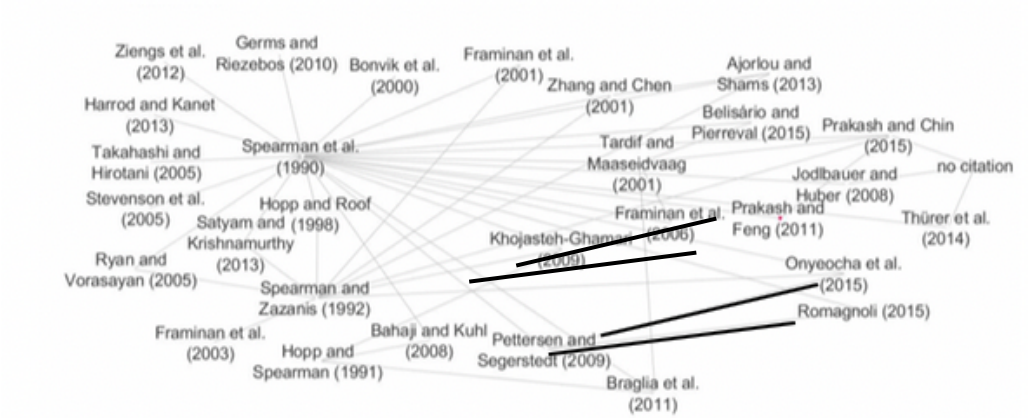

Figure 17. Citations des articles REX par tous les articles étudiés

Considérant les dix documents (publiés entre 1992 et 2014) mentionnés dans la figure 13 et le résultat montré par la figure 17 sur les pistes de recherche fermées, il apparait que la question du retour d'expérience de ConWip peut être considérée comme toujours ouverte. À l'instar de Prakash et Chin (2015) qui demandent une mise en place d'un atelier piloté en ConWip pour fournir une étude scientifique de type REX industriel, nous mettrons en avant la nécessité d'une telle étude.

Synthèse du chapitre 3

Du point de vue de la prise de décision, notre revue des principaux axes de recherche proposés par la littérature au sujet du ConWip permet de soulever les questions suivantes :

- Quel PCS correspond le mieux à un environnement donné et comment peut-il être personnalisé pour l'environnement en question ?
- Comment comparer plusieurs PCS de manière objective ?
- Comment un PCS choisi pour un contexte donné peut-il être fidèlement modélisé ?
- Quel retour d'expérience peut-on utiliser pour valider les réponses aux trois questions précédentes ?
- Comment un PCS sélectionné doit-il être implémenté et optimisé ?

La littérature met en évidence de nombreuses pistes qui devraient être explorées pour répondre efficacement aux questions au sujet des PCS qui sont soulevées à des fins de prise de décision. L'adaptation du ConWip à un environnement spécifique, tel qu'une industrie très complexe caractérisée par une fabrication à la commande, un mix modèle élevé, des ateliers de type jobshop et un ensemble hétérogène de gammes opératoires constituent un défi de recherche important. La construction d'un cadre de comparaison global pour les PCS est une autre question fondamentale pour de futures recherches. Le besoin de retours d'expériences industrielles donne aussi lieu à des pistes de recherche stimulantes et utiles. Enfin, la conception adaptative du ConWip et du ConWip multiboucle personnalisées conduira sans aucun doute à des réalisations majeures.

Dans ce riche ensemble des voies de recherche au sujet du ConWip, nous donnons la priorité à une direction pour la suite de cette thèse. Elle concerne la définition d'un ConWip basé sur une gamme générique pour résoudre les problèmes d'application du ConWip aux environnements caractérisés par un mix modèle large.

4. DEFINITION ET EVALUATION DES ALGORITHMES GENERATIFS DE GAMMES ENVELOPPES

.

4.1 Introduction
4.2.Contexte
4.3.Formulation du problème
4.4.Méthodologie
4.5.Résultats

La tendance pousse les industriels à personnaliser leurs produits pour répondre à la demande des clients. Dans ce contexte, le ConWip fournit un système de contrôle de la production durable, efficace et adaptatif. Le présent chapitre traite des questions clés liées à la mise en œuvre du ConWip dans un environnement caractérisé par un mix produit élevé et/ou un mix de gammes opératoires élevé. Quatre algorithmes qui permettent, à partir d'un jeu de gammes opératoires, de générer une gamme « moyenne » appelée ici « gamme enveloppe », sont présentés. Ces gammes enveloppes sont ensuite implémentées dans Wipsim, un outil d'ingénierie utilisé dans les projets pour concevoir et améliorer les lignes d'assemblages pilotées par un ConWip, ce qui permet de calculer les paramètres ConWip optimisés pour chacune de ces gammes. Un échantillon de données, issues d'un cas industriel, est utilisé pour tester les quatre modèles obtenus. Nous les comparons sur le plan de leur sensibilité aux variations de mix produit et à l'introduction de différents produits atypiques. Nos expériences montrent d'une part que nos algorithmes génèrent des gammes enveloppes viables et d'autres parts fournissent des éléments permettant de choisir entre les quatre solutions proposées en fonction du contexte.

4.1. INTRODUCTION

La possibilité de choisir le système de contrôle de la production (PCS) le plus adapté représente un problème majeur qui influe fortement sur l'efficacité d'un système de production dans notre environnement Vulnérable, Incertain, Complexe et Ambigu (VUCA). Une illustration appropriée est donnée par le contexte stimulant du développement durable qui traite de l'empreinte écologique et des objectifs de réduction de la consommation d'énergie.

Un PCS adapté doit être capable de contrôler correctement le niveau de stock et, en même temps, de fournir une réponse pertinente à une personnalisation élevée et une réponse réactive aux demandes changeantes des clients. Dans un tel contexte, le ConWip fait partie des bons candidats PCS pour fournir la flexibilité et l'efficacité attendue en supportant plusieurs produits et faisant l'objet d'une demande fluctuante. La pierre angulaire du ConWip consiste à contrôler la quantité totale de travail sur la ligne de production en la maintenant constante. Cette capacité est enracinée dans la loi construite par Little (1961), communément appelée « Little's Law » :

Work in Process = Throughput * Makespan

Depuis son introduction par Sperman et al. (1990), plusieurs travaux ont étudié la différence entre le ConWip et le Kanban développé par Toyota (Sperman et al. (1990), Takahashi et al 2002, Takahashi et al 2005, Pettersen et al. Jing-Wen Li 2010). (Jaegler et al., 2017) ont mis à jour la dernière revue de la littérature au sujet du ConWip (Framinan, Gonzalez et Ruiz-Usano 2003) réalisée en 2003 et suggéré plusieurs pistes de recherche non résolue le concernant. Ces axes de recherche portent sur la mise en œuvre et l'optimisation du ConWip, l'environnement dans lequel il est implémenté, la méthodologie de comparaison du ConWip avec d'autres PCS, les outils de simulation de son fonctionnement et les retours d'expériences industrielles impliquant le ConWip.

Nous avons décidé de nous concentrer sur des pistes de recherche liées à l'environnement de production dans lequel est implémenté le ConWip. Trois thèmes liés aux contextes productifs sont mis en évidence. L'un d'eux concerne les caractéristiques du mix produit. Les questions clés sont liées à un mix produit élevé et/ou à un mix gammes opératoires élevées. Même si (Prakash et Chin 2015 a) expliquent que le ConWip a été « initialement conçu pour la fabrication dans un environnement caractérisé par des gammes de produits constantes, des temps opératoires similaires, des temps de changement de série réduits et des ateliers de type flowshop » (Spearman et Zazanis 1992) ont suggéré depuis 1992 d'utiliser la notion de gammes pour optimiser le système ConWip. Le lien entre les gammes et le dimensionnement du ConWip est le point central de leur théorie. (Ziengs, Riezebos et Germs 2012) s'intéressent également à ce concept et proposent de construire un ConWip basé sur la charge de travail.

En plus de cela (Khojasteh-Ghamari 2009) dont le modèle est basé sur la production d'un produit unique, affirme que l'étude d'un environnement plus complexe (en particulier avec un enjeu multiproduit) représente l'axe de recherche futur le plus intéressant. Sur la même ligne (Parvin et al., 2012) proposent également d'explorer le sujet du ConWip dans des environnements de fabrication complexes. (Takahashi et Nakamura 2002) étudient aussi le ConWip dans les chaînes d'approvisionnement complexes. (Satyam et Krishnamurthy 2013) ajoutent que la compréhension des interactions complexes dans un environnement multiproduit est cruciale. En conclusion, l'idée consiste à trouver le nombre optimal de tickets et la meilleure taille de lot pour les gammes considérées afin d'optimiser le ConWip (Eng et Sin 2013), (Prakash et Chin 2015b).

Un intérêt croissant pour l'étude du ConWip dans un environnement multiproduit s'est clairement concrétisé dans la littérature. Par exemple, Herer et Masin 1997 ont développé un modèle de programmation mathématique pour un système de flux de production ConWip multiproduit. L'objectif affiché consiste à déterminer la séquence de production optimale, mais ils ne sont néanmoins pas en mesure de proposer un algorithme permettant de résoudre complètement la problématique. Ryan et al. 2000 commencent par étudier (en mettant l'accent sur le service client) un environnement de travail piloté par un ConWip dans lequel deux produits avec des gammes distinctes utilisent le même ensemble de ressources, puis un système multiproduit piloté par un CONWIP est modélisé sur la base d'un réseau fermé de files d'attente multichaîne à plusieurs classes (Ryan et Vorasayan 2005). Satyam et al. 2008 proposent une nouvelle approche basée sur la décomposition paramétrique pour modéliser analytiquement un système de fabrication multiproduit piloté grâce à un ConWip à l'aide de réseaux fermés de files d'attente et une synchronisation des postes de travail. Une autre illustration est donnée par le travail de Park et Lee 2013, ils ont étudié un système de production multiproduit qui permet d'assembler un produit fini pour répondre à une commande client. Le produit fini est composé d'un kit de différents composants fabriqués par le même système. Ils supposent que les commandes arrivent conformément à une distribution de Poisson et que les temps de traitement de chaque station suivent une distribution de Coxian.

Pour synthétiser les éléments précédents, il semble que l'optimisation d'un ConWip dans un environnement multiproduit caractérisé par un mix produit élevé et/ou un mix gamme élevée n'a pas été résolue. En plus de cela, cette optimisation représente un réel besoin dans les environnements de fabrication. Par conséquent, ce chapitre propose une solution à ce problème dans une direction majeure qui consiste à définir un ConWip générique basé sur la gamme enveloppe des produits mis en jeu et à utiliser cet outil pour résoudre le problème d'optimisation qui a été énoncé. Pour définir un tel ConWip, une gamme unique doit être définie pour représenter les gammes des différents produits. Grâce à quatre algorithmes, cette section étudie la question de la définition d'une telle gamme représentative, appelée « gamme enveloppe ». Un échantillon numérique dérivé de données industrielles est ensuite utilisé. Les quatre algorithmes sont testés avec cet échantillon selon différents scénarios. Ce chapitre est organisé comme suit : la méthodologie est d'abord détaillée puis les résultats obtenus sont analysés et discutés, enfin de futures pistes de recherche sont proposées.

4.2. CONTEXTE

La motivation de cette étude réside dans le fait que la théorie du ConWip reste à compléter et qu'elle représente un réel intérêt pour l'industrie. Pettersen et Segerstedt 2009 expliquent que l'absence de directives d'installation de ConWip constitue un obstacle à l'utilisation du système. En pratique, ceci signifie qu'il n'est pas trivial d'installer un ConWip et que la plupart des systèmes ERP (Enterprise Resource Planning) existants ne contiennent pas de fonctionnalités pour la mise en œuvre d'un ConWip, en particulier dans le contexte multiproduit.

Plusieurs contributions montrent comment dimensionner un ConWip (nombre de tickets et taille de lot) centré sur une gamme de fabrication unique (par exemple (Hopp et Spearman 1996) pour le nombre de tickets et (Zhang et Chen 2001) pour la taille de lot). Néanmoins, dans la pratique, une chaîne de production fabrique des produits différents avec des gammes différentes.

Dans ce cas, le corps de la littérature n'aide guère sur la façon d'optimiser le dimensionnement d'un ConWip. En effet, la littérature au sujet du ConWip contient des outils d'optimisation, le premier a été donné par Hopp et Spearman (1996). Tous basent leur calcul sur la gamme unique d'un produit unique. Dans le cas où un environnement multiproduit doit être considéré, les solutions potentielles pourraient être ancrées dans un outil de simulation qui « joue » la future séquence de production prévue afin d'optimiser le ConWip grâce à une recherche par dichotomie comme le montrent Belisario et al. 2015. Ces solutions potentielles sont pertinentes, mais elles impliquent de simuler la séquence de production future pour chaque changement non planifié. Cela ne constitue pas nécessairement un obstacle du point de vue de l'outil théorique ou informatique, mais cette solution serait difficile à mettre en œuvre d'un point de vue opérationnel en raison des multiples changements du nombre de tickets et de la taille de lot qui seraient occasionnés. En plus de cela, l'effet de chaque changement pourrait potentiellement être partiellement annulé par l'effet du suivant, ce qui entraînerait un processus d'exploitation très instable (Jaegler et al., 2017).

Cela signifie qu'il sera difficile pour un praticien de calculer les meilleurs ou même les bons paramètres pour dimensionner son ConWip. En effet, même le plus simple des modèles mathématiques de dimensionnement du ConWip est souvent NP-complet et donc difficile à optimiser pour un cas réel qui implique un grand nombre de produits et de machines. Il n'aura alors pas d'autre choix que d'utiliser l'expérience ou de procéder par tests successifs sur les différents paramètres.

Cet état de fait est illustré par (Jaegler et al., 2017) qui expliquent que la littérature met en lumière de nombreuses pistes qui devraient être explorées pour répondre efficacement aux questions liées aux PCS et en relation avec la notion de prise de décision. L'adaptation du ConWip à un environnement spécifique, tel qu'une industrie très complexe caractérisée par une fabrication à la commande, un mix produit élevé, des ateliers de type jobshop et un ensemble hétérogène de gammes opératoires, constitue un défi de recherche important. En plus de cela, ils proposent de prioriser deux voies de recherche ouvertes au sein de la riche littérature au sujet du ConWip.

La première concerne la définition d'un ConWip basée sur une gamme enveloppe pour résoudre les problèmes de mix produit élevé. Dans le cas d'un environnement en mouvement, l'optimisation basée sur l'expérience ou sur des tests successifs prendrait trop de temps pour constituer une réelle solution. Dans ce contexte, la question à laquelle ce chapitre va tenter de répondre est la suivante : comment peut-on déterminer quels paramètres utiliser pour dimensionner un système ConWip dans un environnement multi produits en mouvement ?

4.3. FORMULATION DU PROBLEME

Le système de production multiproduit considéré dans cette section consiste en une ligne de production avec plusieurs postes de travail. Chaque poste de travail peut traiter plusieurs opérations. La ligne de production fabrique divers produits et chaque produit a sa propre gamme opératoire. Chaque gamme comprend plusieurs opérations à traiter à l'aide d'un ensemble de postes de travail. Nous supposons que la ligne est sous un contrôle de production ConWip. Il existe un temps opératoire et un temps de changement de série correspondant à chaque paire (produit, opération).

Le modèle de programmation mathématique utilisé pour le système de production ci-dessus vise à optimiser la gamme enveloppe en utilisant le nombre minimum d'opérations pour la construire et en respectant les conditions de chronologie entre les postes à l'intérieur de cette gamme (aucun retour en arrière autorisé pour aucun des produits).
Les notations suivantes sont utilisées dans notre modèle mathématique.

4.3.1. Paramètres

W_l : le numéro du poste de travail l de l'atelier ou de la ligne de production, l = 1, ..., o
n : le nombre de produits
m : le nombre d'opérations
i : l'indice du produit, i = 1..n

j : l'indice de l'opération, i = 1..m

m_i: le nombre d'opérations dans la gamme du produit i

T_{ij}: le temps d'installation nécessaire à l'opération j pour le produit i

P_{ij}: le temps de traitement de l'opération j pour le produit i

r_0 : le nombre maximal de postes de travail autorisés à être utilisés pour former la gamme enveloppe sur la chaîne de fabrication

Soit:

- $a_{jl}^{i} = \begin{cases} 1 \; si \; la \; j^{eme} \; opération \; sur \; le \; i^{eme} \; produit \; est \; faite \; sur \; le \; poste \; de \; travail \; W_l \\ 0 \qquad sinon \end{cases}$

  $\sum_{j=1}^{mi} \sum_{l=1}^{o} a_{jl}^{i} = 1, \quad \forall i = 1..n$

4.3.2. Variables de décisions

$$X_{l,p} = \begin{cases} 1 \quad si \; le \; poste \; de \; travail \; W_l \; est \; assigné \text{ à } la \; position \; p \\ 0 \qquad sinon \end{cases}$$

$$Y_{i,j,p} = \begin{cases} 1 \qquad si \; la \; j^{eme} \; opération \; sur \; le \; i^{eme} \; produit \; est \; faite \; sur \; le \; poste \; de \; travail \; assigné \text{ à } la \; position \; p \\ 0 \qquad sinon \end{cases}$$

En considérant ces notations et hypothèses, le problème est modélisé comme suit :

$$min \sum_l \sum_p X_{l,p} \qquad (1)$$

Avec :

$$\sum_p X_{l,p} \geq 1, \forall \, l = 1..o \qquad (2)$$

$$\sum_l X_{l,p} = 1, \forall \, p = 1..r_0 \qquad (3)$$

$$\sum_p Y_{i,j,p} \, X_{l,p} = a_{jl}^{i}, \forall \, l = 1..o, \forall \, i = 1..n, \forall \, j = 1..m \qquad (4)$$

$$\sum_{i,j} Y_{i,j,p} \geq 1, \forall \, p = 1..r_0 \qquad (5)$$

$$\sum_p Y_{i,j,p} = 1, \forall \, i = 1..n, \forall \, j = 1..m_i \qquad (6)$$

$$\sum_p p \, Y_{i,j,p} \leq \sum_k k \, Y_{i,j,k}, \forall j = 1 \ldots m_i, \; j < l, \forall i = 1..n \qquad (7)$$

$$X_{l,p} \in \{0,1\} \; \forall l = 1..o, \forall \, p = 1..r_0 \qquad (8)$$

$$Y_{i,j,p} \in \{0,1\} \; \forall i = 1..n, \forall j = 1..m_i, \forall \, p = 1..r_0 \qquad (9)$$

4.3.3. Fonction objectif

La fonction objectif (1) consiste à minimiser le nombre de postes de travail utilisés pour former le gamme enveloppe sur la chaîne de fabrication. Les contraintes sont les suivantes :
(2) : Chaque poste de travail doit être affecté à au moins une position dans la gamme enveloppe
(3) : Chaque position dans la gamme enveloppe est affectée à un unique poste de travail
(4) : Chaque tâche j sur le produit i est affectée à un unique poste de travail
(5) : Au moins une opération est effectuée dans chaque poste de travail dans la gamme enveloppe
(6) : Chaque tâche j sur le produit i est affectée à une unique position dans la gamme enveloppe
(7) : Les chronologies des opérations de toutes les gammes opératoires sont respectées par la gamme enveloppe
(8), (9) : Définition des variables de décision

Ce problème est NP complet, l'utilisation d'une méthode dite exacte pour sa résolution est donc possible pour les instances de petite taille, mais pour les plus grandes, nous devons appliquer une procédure heuristique ou métaheuristique par exemple : simulation de recuit, recherche tabou, algorithme génétique ... même si ces dernières ne garantissent pas le caractère optimal de la solution.

4.3.4. Approche de solution

Pour répondre à la question sur l'optimisation du ConWip dans un environnement multiproduit, nous proposons de déterminer une gamme opératoire pouvant être considérée comme représentative de l'ensemble des gammes de fabrication. Cette gamme représentative est appelée gamme enveloppe. Nous l'utiliserons comme la gamme de l'environnement simplifié caractérisé par un produit « virtuel » unique. Cet environnement simplifié simulera l'environnement multiproduit auquel nous nous intéressons. Cette approche simplificatrice permet de réduire la complexité du problème initial afin de lui apporter une réponse théorique.

En outre, dans le cas où la solution s'avére acceptable, elle représente également une option qui permet de résoudre le problème de dimensionnement du ConWip directement dans l'atelier par des opérationnels. Dans ce cadre, le présent chapitre montre comment définir une gamme enveloppe répondant aux deux contraintes suivantes :

- la séquence des opérations dans la gamme enveloppe n'engendrera aucun retour en arrière pour aucun produit ; ceci afin de garantir un pilotage efficace de l'atelier,
- afin d'éviter la redondance des opérations, la gamme enveloppe la plus courte sera recherchée.

Dans ce chapitre, quatre algorithmes capables de construire une gamme enveloppe sont proposés. Après cela, l'objectif poursuivi consiste à qualifier les performances des différents algorithmes afin d'apporter une valeur ajoutée pour les chercheurs et/ou les industriels qui souhaiteraient les utiliser et donc choisir parmi eux.

Pour ce faire, nous avons choisi d'utiliser l'angle de vue d'un industriel qui doit faire face à un environnement multiproduit caractérisé par des instabilités de la demande. Dans un tel cas, il lui est nécessaire d'évaluer l'impact d'un changement (variation du mix modèle, changement de produit, produit personnalisé...) sur la performance de l'atelier. La réponse que nous essayons d'apporter n'est pas directement formulée en matière de performance (temps de traitement, efficacité, délais de livraison), car nous ne cherchons pas à simuler le comportement complet d'un atelier déterminé. Nous essayons plutôt de donner des éléments permettant de faire le meilleur choix entre les algorithmes que nous avons construits. Dans ce cadre, nous avons décidé de comparer les gammes enveloppes induites par les quatre algorithmes à travers l'impact de différents types de variations sur leurs paramètres théoriques optimisés. Si chaque variation implique un changement significatif des paramètres optimisés, cela signifie qu'une perte de performance se produirait dans ce cas particulier.

4.4. METHODOLOGIE

4.4.1. Processus de recherche

Le processus de recherche est le suivant. Nous concevons quatre algorithmes dans le but de définir une gamme enveloppe. Ces gammes enveloppes sont implémentées dans un outil de simulation capable de calculer les paramètres optimisés du ConWip : nombre de tickets et taille de lot.

Les algorithmes construisent des gammes enveloppes sur la base d'un échantillon de données industrielles. Ensuite, nous effectuons une analyse de sensibilité à la fois pour les variations du mix modèle et la séquence des produits. De plus, nous testons la robustesse des résultats des algorithmes dans différents scénarii qui consistent à intégrer un produit atypique dans le mix modèle. Pour simuler ce scénario, nous ajoutons d'abord un temps opératoire élevé dans la gamme de l'un des produits existants. L'augmentation du temps opératoire est intégrée au début de gamme, puis à la fin. Ensuite, nous simulons ce scénario en intégrant un produit atypique dans le mix modèle.

Considérant le problème générique de construction de gamme, nous choisissons ici d'intégrer un produit avec un nombre élevé d'opérations. Pour ce faire, nous convertissons le premier produit de l'échantillon en un produit atypique. Enfin, nous analysons les résultats de l'ensemble des scénarii et concluons.

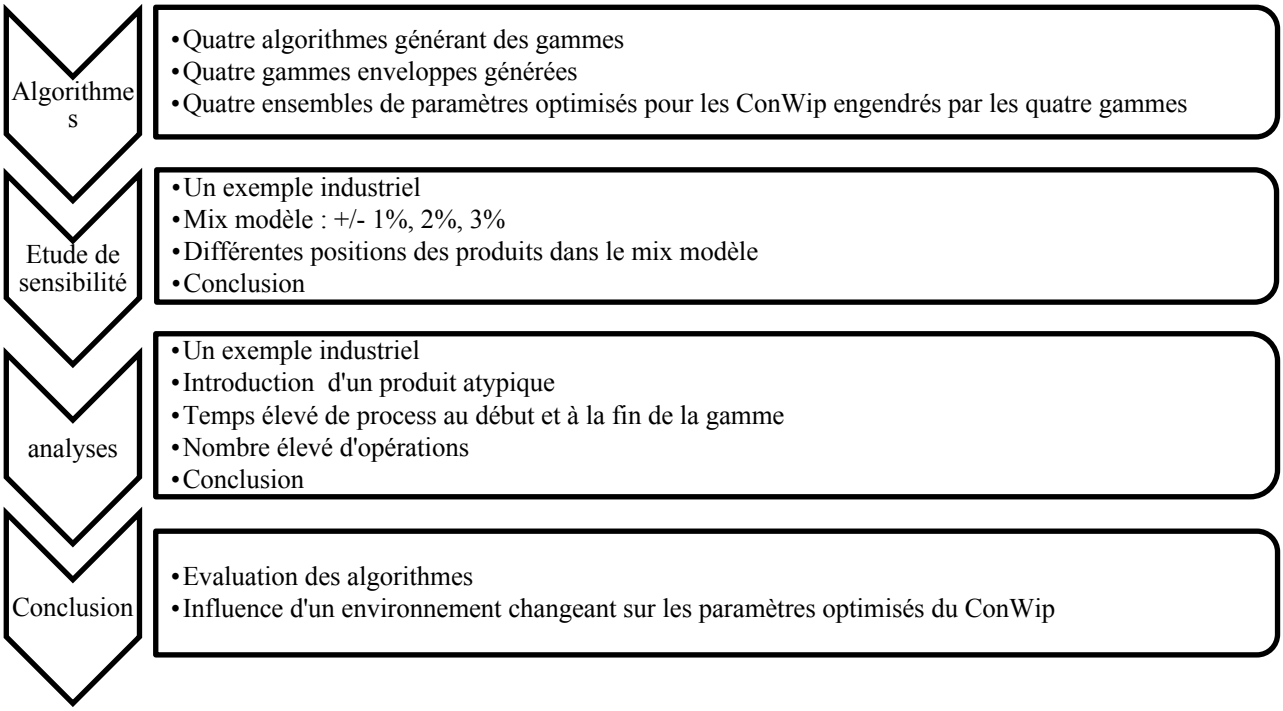

Figure 18. Processus de recherche

4.4.2. Algorithmes

La première étape consiste à concevoir les quatre algorithmes pour déterminer une gamme enveloppe pour une combinaison de gammes données. Nous présentons les quatre algorithmes dans cette sous-section. Pour une meilleure compréhension, il est pertinent de spécifier ici des éléments de vocabulaire :

- la gamme enveloppe générée est appelée "gamme enveloppe finale",
- toutes les gammes successives calculées par les algorithmes pour obtenir finalement la "gamme enveloppe finale" sont appelées "gammes enveloppes intermédiaires". Elles sont nécessaires pour le calcul, mais n'ont pas de valeur pour le résultat final.

Les paramètres suivants sont utilisés :

$mIGRO_k$: $le\ nombre\ d'opérations\ dans\ la\ gamme\ enveloppe\ intermédiaire\ k$

$mGRO$: $le\ nombre\ d'opérations\ dans\ la\ gamme\ enveloppe\ finale$

O_{ij}: $opération\ j$ de la gamme du produit i

$W\ (O_{ij})\ opération\ j\ de\ la\ gamme\ du\ produit\ i$

β_i poids en pourcentage associé au produit $i\ dans\ le\ mix$

Ce qui implique :

$$\sum_{i=1}^{n} \beta_i = 1$$

$IGRT_{kj}$ le temps de réglage de l'opération $j\ pour\ la\ gamme\ enveloppe\ intermédiaire\ k$

$IGRP_{kj}\ le\ temps\ de\ process\ de\ l'opération\ j$ pour la gamme enveloppe intermédiaire k

$IGRO_{kj}(W_l, IGRT_j, IGRP_j)\ l'opération\ j\ de\ la\ gamme\ enveloppe\ intermédiaire\ k$

$GRT_j\ \ le\ temps\ de\ réglage\ de\ l'opérarion\ j$ pour la gamme enveloppe finale

$GRP_j\ le\ temps\ de\ process\ de\ l'opération\ j\ pour\ la\ gamme\ enveloppe\ finale$

$GRO_j(W_l, GRT_j, GRP_j)\ l'opération\ j\ de\ la\ gamme\ enveloppe\ finale$

4.4.2.1. Algorithme “deux à deux”

Cet algorithme « additionne » les gammes deux par deux. Cela signifie que deux premières gammes de produits sont considérées, la première opération de la première gamme est comparée avec la première opération de la deuxième gamme, et la deuxième opération de la première gamme est comparée avec la deuxième opération de la deuxième gamme. Nous sommons les opérations si elles sont identiques (ce qui signifie effectuées sur la même machine ou poste de travail). Sinon nous gardons la première. Nous appliquons ce processus à l’ensemble des opérations des deux gammes. Nous obtenons une nouvelle gamme, appelé première gamme enveloppe intermédiaire. Ensuite, nous ajoutons cette nouvelle gamme à la troisième gamme produit pour obtenir la deuxième gamme enveloppe intermédiaire. Le processus se poursuit jusqu’à ce que toutes les gammes des produits aient été ajoutées. L’ensemble de ce processus aboutit à la gamme enveloppe finale. Les opérations j de la gamme enveloppe intermédiaire k sont définies comme suit :

For k ≠ 1:

$$(1) IGRO_{kj} = \left\{ \begin{matrix} \beta_{k+1} O_{k+1j} + IGRO_{k-1j} + \beta_{k+1} O_{k+1j+1} + IGRO_{k-1j+1} \\ if\ W\left(O_{k+1j}\right) = W\left(IGRO_{k-1j}\right) = W\left(O_{k+1j+1}\right) = W\left(IGRO_{k-1j+1}\right) \end{matrix} \right\}$$

$$(2) IGRO_{kj} = \left\{ \begin{matrix} \beta_{k+1} O_{k+1j} + IGRO_{k-1j} + \beta_{k+1} O_{k+1j+1} \\ if\ W\left(O_{k+1j}\right) = W\left(IGRO_{k-1j}\right) = W\left(O_{k+1j+1}\right), and <> W\left(IGRO_{k-1j+1}\right) \end{matrix} \right\}$$

$$(3) IGRO_{kj} = \left\{ \begin{matrix} \beta_{k+1} O_{k+1j} + IGRO_{k-1j} + IGRO_{k-1j+1} \\ if\ W\left(O_{k+1j}\right) = W\left(IGRO_{k-1j}\right) = W\left(IGRO_{k-1j+1}\right), and <> W\left(O_{k+1j+1}\right) \end{matrix} \right\}$$

$$(4) IGRO_{kj} = \left\{ \begin{matrix} \beta_{k+1} O_{k+1j} + \beta_{k+1} O_{k+1j+1} + IGRO_{k-1j+1} \\ if\ W\left(O_{k+1j}\right) = W\left(O_{k+1j+1}\right) = W\left(IGRO_{k-1j+1}\right), and <> W\left(IGRO_{k-1j}\right) \end{matrix} \right\}$$

(5) $$IGRO_{kj} = \left\{ \begin{matrix} \beta_{k+1} O_{k+1j} + IGRO_{k-1j} \\ if\ W\left(O_{k+1j}\right) = W\left(IGRO_{k-1j}\right), and <> W\left(O_{k+1j+1}\right), and <> W\left(IGRO_{k-1j+1}\right) \end{matrix} \right\}$$

(6) $$IGRO_{kj} = \left\{ \begin{matrix} \beta_{k+1} O_{k+1j} + \beta_{k+1} O_{k+1j+1} \\ if\ W\left(O_{k+1j}\right) = W\left(O_{k+1j+1}\right), and <> W\left(IGRO_{k-1j}\right), and <> W\left(IGRO_{k-1j+1}\right) \end{matrix} \right\}$$

(7) $$IGRO_{kj} = \left\{ \begin{matrix} \beta_{k+1} O_{k+1j} + IGRO_{k-1j+1} \\ if\ W\left(O_{k+1j}\right) = W\left(IGRO_{k-1j+1}\right), and <> W\left(O_{k+1j+1}\right), and <> W\left(IGRO_{k-1j}\right) \end{matrix} \right\}$$

(8) $$IGRO_{kj} = \left\{ \begin{matrix} \beta_{k+1} O_{k+1j} \\ if\ W\left(O_{k+1j}\right) <> W\left(IGRO_{k-1j+1}\right), and <> W\left(O_{k+1j+1}\right), and <> W\left(IGRO_{k-1j}\right) \end{matrix} \right\}$$

For k = 1, le process est le même en utilisant $\beta_1, O_{1j}, \beta_2, O_{2j}$ au lieu de $\beta_{k+1}, O_{k+1j}, O_{k+1j+1}, IGRO_{k-1}, IGRO_{k-1j+1}$ sauf dans les cas de figure (4) et (7) qui sont alors interdits dans la mesure où ils conduiraient à un retour en arrière.

4.4.2.2. Algorithme de “la plus grande occurrence”

Nous considérons ici toutes les premières opérations de tous les produits. Le poste de travail ayant l’occurrence la plus élevée est alors défini comme le poste de travail ($W\ (GRO_1)$) de la première opération (GRO_1)de la gamme enveloppe (parmi les $W\ (O_{1j}),\ j = 1, \dots, m$). Nous calculons le temps opératoire GRP_1 de la première opération de gamme enveloppe en ajoutant les temps de traitement O_{1j} qui correspondent au poste de travail ($W\ (GRO_1)$) multipliés par leurs poids respectifs dans le mix. Le même calcul est effectué pour le temps de changement de série. Si toutes les opérations sont différentes et affichent par conséquent chacune une occurrence de 1, celle du premier produit est conservée pour la gamme enveloppe. Toutes les opérations inutilisées sont ensuite décalées d'une étape vers l’aval. Nous réappliquons le processus jusqu'à la dernière opération. Pour définir la gamme enveloppe, nous calculons :

$C_l\ \ les\ occurences\ des\ W\ (O_{jl})\ , l = 1, \dots, o$

Ensuite, nous sélectionnons z vérifiant : $C_z\ = Max\ (C_l), l = 1, \dots, o$

Ensuite, nous calculons :

$$\left\{\sum_{i=1}^{n} \beta_i T_{ij}\ \ with\ i\ /\ W\ (O_{ij}) = W\ (O_{iz})\right\}$$

$$GRP_j = \left\{\sum_{i=1}^{n} \beta_i P_{ij}\ \ with\ i\ /\ W\ (O_{ij}) = W\ (O_{iz})\right\}$$

Nous définissons pour finir : $GRO_j\big(W\ (O_{jz})\ , GRT_j, GRP_j\ \big)$

4.4.2.3. Algorithme du “plus grand temps de process”

Nous considérons toutes les premières opérations de tous les produits. Nous considérons ensuite les sommes, pour chaque poste de travail, des temps opératoires issus de ces premières opérations. Nous définissons le poste de travail ($W\ (GRO_1)$) de la première opération (GRO_1) de la gamme enveloppe comme le poste de travail (parmi les $W\ (O_{1j}),\ j = 1, \dots, m$) qui est le plus chargé lorsqu’on considère les sommes évoquées ci-dessus. Nous calculons le temps de traitement GRP_1 de la première opération de la gamme enveloppe en ajoutant les temps de traitement des O_{1j} correspondant au poste de travail ($W\ (GRO_1)$ multipliés par leurs poids respectifs dans le mix. Le même calcul est effectué pour le temps de changement de série.

Si toutes les opérations sont différentes et que plusieurs d'entre elles sont chargées de manière égale, l'opération du premier produit considéré est conservée. Toutes les opérations inutilisées sont décalées vers l'aval. Nous réappliquons le processus jusqu'à la dernière opération. Pour définir la gamme enveloppe, nous recherchons :

$$z/\sum_{i=1}^{n} P_{iz} = Max(\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} P_{ij})$$

Puis nous calculons :

$$GRT_j = \sum_{i=1}^{n} \beta_i T_{ij} \ \ with\ i\ /\ W\left(O_{ij}\right) = W\ (O_{iz})$$

$$GRP_j = \sum_{i=1}^{n} \beta_i P_{ij} \ \ with\ \ i\ /\ W\left(O_{ij}\right) = W\ (O_{iz})$$

Enfin, nous définissons : $GRO_j\left(W\left(O_{jz}\right), GRT_j, GRP_j\right)$

4.4.2.4. Algorithme accordéon

Pour cet algorithme, nous considérons toutes les gammes des différents produits dans un même temps. Nous considérons le poste de travail de la première opération du premier produit ($W\ (O_{11})$). Si le poste de travail de la première opération du deuxième produit $W\ (O_{21})$ est le même, il reste dans cette position. Si les deux postes de travail sont différents, il passe en position deux dans la gamme enveloppe, ce qui signifie que (O_{21}) devient (O_{22}) et (O_{21}) est remplacé par une opération vide (pas de poste de travail, temps de changement de série égal à 0 et temps de traitement égal à 0). Nous répétons ce processus pour les premières opérations de tous les produits et nous ajoutons toutes les premières opérations restantes. La deuxième étape consiste à passer par le même processus pour la deuxième opération de tous les produits, et ainsi de suite, jusqu'à la dernière opération du dernier produit. Si nécessaire, une opération du premier produit peut également être sautée et remplacée par une opération vide. L'ensemble du processus est illustré par un exemple schématique :

La convention de notation suivante est utilisée dans l'exemple ci-dessous :

Workstation	
Setup time	Operating Time

Product 1	A		B		C		D	
	0,5	2	1	3	0,5	4	1	4
Product 2	B		A		E		D	
	1	2	0,5	3	0	0,5	1	3
Product 3	A		C		E			
	0,5	2	1	3	0	1		

Products	Mix
1	20%
2	40%
3	20%

Product 1	A		B		C								D	
	0,5	2	1	3	0,5	4							1	4
Product 2			B				A		E		D			
			1	2			0,5	3	0	0,5	1	3		
Product 3	A				C				E					
	0,5	2			1	3			0	1				
Generic Routing	A		B		C		A		E		D			
	0,2	0,8	0,6	1,4	0,3	1,4	0,2	1,2	0	0,4	0,6	2		

Figure 19. Ensemble du processus

4.5. RESULTATS

Nous testons maintenant ces quatre algorithmes avec un échantillon numérique, dérivé d'un cas industriel. Le but de cette section est de qualifier les quatre algorithmes et d'évaluer leur pertinence.

4.5.1. Exemple numérique

Dans cet exemple simplifié, nous considérons un atelier de production qui fabrique six produits (1 à 6) en utilisant 6 postes de travail (A à F) : deux machines (A et C), trois postes de fraisage (B, D, E) et un poste de travail de contrôle (F). Un temps de process (TP) et un temps de réglages (TR) sont associés à chaque opération.

Tableau 11. Poids dans le mix modèle associés à chaque produit

Produits		**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
Poids dans le mix		17%	17%	17%	17%	17%	17%
Opération 1	nom	A	C	A	A	A	B
	TR	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
	TP	2	3	2	3	2	2
Opération 2	nom	B	D	B	C	C	C
	TR	1	0,5	1	0,5	1	1
	TP	3	3	3	3	3	3
Opération 3	nom	C	E	C	B	D	D
	TR	0,5	1	0,5	1	0,5	0,5
	TP	4	3	4	3	4	4
Opération 4	nom	D	F	F	F	E	E
	TR	1	0	0	0	1	1
	TP	4	1	0,5	1	4	4
Opération 5	nom	F				F	F
	TR	0				0	0
	TP	0,5				0,5	0,5

Le modèle mathématique présenté dans la section "Formulation du problème", pour un problème de taille moyenne (Tableau 12), est codé par un solveur général standard, ILOG CPLEX, sur un PC typique (Intel Core i7 2600 @ 3.4 GHz, 8 Go Ram). CPLEX, qui résout le modèle en utilisant la méthode Branch and Bound, a besoin de quelques minutes pour trouver la solution optimale.

Le mix modèle de cet échantillon est parfaitement homogène. Les gammes enveloppes obtenues grâce aux quatre algorithmes sont les suivantes.

Tableau 12. Gammes enveloppes obtenues

Algorithme		Deux à deux	Plus grande occurrence	Plus grand temps de process	Accordéon
	nom	B	A	A	A
Poste 1	TR	0,08	0,25	0,33	0,33
	TP	0,3	1,5	1,5	1,5
	nom	A	B	C	B
Poste 2	TR	0,33	0,375	0,33	0,4
	TP	1,5	1,2	1,5	1,33
	nom	C	C	B	C
Poste 3	TR	0,6	0,65	0,58	0,67
	TP	2,67	3,3	1,83	3,3
	nom	D	D	C	D
Poste 4	TR	0,17	0,4	0,33	0,42
	TP	1,3	2,4	1,83	2,5
	nom	E	E	D	E
Poste 5	TR	0,17	0,5	0,42	0,5
	TP	0,7	1,8	2,5	1,83
	nom	B	F	E	B
Poste 6	TR	0,5	0	0,5	0,2
	TP	1,5	0,5	1,83	0,5
	nom	F	B	F	F
Poste 7	TR	0	0,2	0	0
	TP	0,4	0,6	0,67	0,7
	nom	E	F		
Poste 8	TR	0,17	0		
	TP	0,7	0,2		
	nom	D			
Poste 7	TR	0,1			
	TP	0,5			
	nom	C			
Poste 8	TR	0,1			
	TP	0,7			
	nom	E			
Poste 9	TR	0,17			
	TP	1			
	nom	D			
Poste 10	TR	0,2			
	TP	0,67			
	nom	F			
Poste 11	TR	0			
	TP	0,25			

Les paramètres optimisés des ConWip liés à chacune des 4 gammes enveloppes sont calculés grâce à Wipsim qui est un outil d'ingénierie utilisé dans les projets de conception et d'amélioration des lignes ConWip.

Tableau 13. Paramètres optimisés du ConWip

Modèle	Tickets ConWip	Tailles de lot
Deux à deux	11 to 14	2
Plus grande occurrence	6 to 8	2
Plus grand temps de process	7 to 9	3
Accordéon	6 to 7	3

Les valeurs de ces paramètres fournissent des résultats de référence. Nous pouvons remarquer que les trois derniers algorithmes induisent des paramètres optimisés similaires alors que le premier algorithme propose un nombre significativement plus élevé de tickets ConWip. Dans l'étape suivante, nous testerons la sensibilité des quatre algorithmes au poids de chacun des produits présents dans le mix.

4.5.2. Analyse de sensibilité

Une étude de sensibilité à la variation du mix modèle est clairement pertinente pour qualifier les quatre algorithmes. En effet, prenons le cas où un industriel utilise une gamme enveloppe puis les paramètres optimisés du ConWip associé. Après quoi la boucle ConWip est dimensionnée sur la ligne d'assemblage grâce aux paramètres calculés. Il devient pertinent de savoir ce qui se passera dans le cas où le mix produit évoluerait. Par exemple, cela peut se produire dans le cas d'une demande instable ou dans le cas de prévision de vente inexacte ou même dans le cas d'une commande annulée. Dans tous ces cas, une faible sensibilité à la variation du mix modèle constituerait un atout majeur pour un industriel.

4.5.2.1. Sensibilité aux variations du mix produit

Dans ce cadre, nous décidons, pour chaque produit, de simuler trois changements de leurs poids respectifs dans le mix modèle : + -1%; + -2%; + -3%. L'amplitude de ces changements a été dimensionnée pour couvrir les cas d'une variation du mix modèle considérée comme habituelle.

Dans tous les cas, si un changement majeur venait à se produire, nous supposons que les paramètres ConWip doivent quoi qu'il en soit être recalculés et que la boucle ConWip doit être redimensionnée afin de maintenir l'efficacité de la chaîne d'assemblage.

Tableau 14. Résultats de la sensibilité aux variations du mix produit

Algorithmes		**Référence**	**+-1%**	**+-2%**	**+-3%**
Deux à deux	Variation Mix	0	0	4,52	9,36
	Tickets ConWip	11 to 14	11 to 14	11 to 14	11 to 14
	Taille de lot	2	2	2	2
Plus grande occurrence	Variation Mix	0	2,31	4,81	7,52
	Tickets ConWip	6 to 8	6 to 8	6 to 8	6 to 8
	Taille de lot	2	2	2	2
Plus grand temps de process	Variation Mix	0	1,17	2,38	3,63
	Tickets ConWip	7 to 9	7 to 9	7 to 9	7 to 9
	Taille de lot	2 to 3	2 to 3	2 to 3	2 to 3
Accordéon	Variation Mix	0	2,04	4,23	6,6
	Tickets ConWip	6 to 7	6 to 7	6 to 7	6 to 7
	Taille de lot	2	2	2	2

Les résultats montrent qu'il n'y a pas de changement en matière de paramètres optimisés ConWip. Les quatre algorithmes ont une faible sensibilité à une variation de mix modèle considérée comme habituelle.

4.5.2.2. Sensibilité à l'ordre des produits pour les algorithmes asymétriques

Les algorithmes deux à deux gammes et accordéon sont asymétriques. Cela signifie qu'un mix modèle donné peut conduire à différentes gammes enveloppes en fonction de l'ordre dans lequel les produits sont « injectés » dans l'algorithme. Par exemple, le choix du premier produit peut modifier la gamme enveloppe finale.

Dans ce cadre, une analyse de sensibilité à la séquence de produits utilisée pour construire la gamme enveloppe s'avère nécessaire. Pour effectuer cette analyse, nous modifions l'emplacement des produits dans la séquence de produits pour conclure sur l'influence de l'ordre en question. Les différentes séquences sont présentées dans le tableau 15.

En blanc, les produits avec 4 opérations, en gris clair avec 5 opérations, et en gris soutenu avec des séquences d'opérations différentes. Les produits 1, 5 et 6 ont cinq opérations. Les produits 2, 3 et 4 ont quatre opérations. Le produit 2 est différent des autres, car sa séquence d'opérations est atypique. Les 5 scénarios choisis mettent en évidence les éléments suivants :

- Scénario 1 : scénario de référence
- Scénarios 2 et 3 : le produit 2 est au début de la séquence. Tout d'abord, les produits sont choisis au hasard (scénario 2) puis les deux premiers produits sont choisis avec quatre opérations.
- Scénario 4 : les trois premiers produits ont cinq opérations. Nous concevons un scénario avec le produit atypique en avant-dernière position.
- Scénario 5 : les deux premiers produits ont quatre opérations. Nous concevons un scénario avec le produit atypique en milieu de séquence.

Tableau 15. Scénarii des différentes séquences de produits

Scénarios	Séquence des produits					
scénario 1: reference	1	2	3	4	5	6
scénario 2	2	3	1	4	5	6
scénario 3	2	3	4	1	5	6
scénario 4	1	5	6	4	2	3
scénario 5	3	4	2	1	5	6

Nous injectons ces cinq scénarii dans les algorithmes « accordéon » et « deux à deux ». Les résultats sont synthétisés dans le tableau 16. Le nombre d'opérations représente la longueur de la gamme enveloppe définie par chaque algorithme, les tickets ConWip et la taille du lot représentent les paramètres optimisés calculés par Wipsim pour les gammes enveloppes données.

Tableau 16. Résultats de la sensibilité aux variations de séquences des produits

	Nombre d'opérations	Ticket ConWip	Taille de lot
Deux à deux			
scénario 1: reference	11	11 to 14	2
scénario 2	16	16 to 17	2
scénario 3	10	9 to 12	2
scénario 4	14	15 to 16	2
scénario 5	14	15 to 16	2
Accordéon			
scénario 1: reference	6	6 to 7	2
scénario 2	9	11 to 12	2
scénario 3	9	11 to 12	2
scénario 4	6	6 to 7	2
scénario 5	6	6 to 7	2

Il apparaît que l'algorithme « deux à deux » est relativement sensible à la position des produits dans la séquence. Le nombre d'opérations dans les gammes enveloppes est fluctuant avec une amplitude de 10 à 16 et le nombre optimal de tickets ConWip est compris entre 9 et 16. Les paramètres de gestion visuelle et de ConWip sont donc clairement et significativement influencés par le choix de la séquence. L'algorithme « accordéon » est plus stable. Nous obtenons deux types de résultats : les scénarios 1, 4 et 5 apportent les mêmes paramètres optimisés alors que les scénarios 2 et 3 apportent des paramètres significativement différents. Le produit 2 est à la première place dans les scénarios 2 et 3. Ce produit a une gamme significativement différente par rapport aux autres produits. En effet, les postes de travail A et B sont absents de sa gamme opératoire. Cet échantillon de données a tendance à montrer qu'il est recommandé de construire une séquence de produits qui débute avec les gammes les plus typiques. En effet, par construction de l'algorithme, les premiers produits injectés ont une influence prégnante sur le profil de la gamme enveloppe. Pour favoriser une faible sensibilité pour cet algorithme, le produit atypique doit par conséquent être situé à la fin de la séquence de produits.

4.5.3. Analyse des scénarios

Après l'analyse de sensibilité qui a montré que les quatre algorithmes ont un taux de sensibilité réduit aux variations dites faibles du mix modèle et que l'algorithme « deux à deux » souffre d'une sensibilité significative à l'ordre des produits dans la séquence prise en compte, nous testerons les quatre algorithmes dans un contexte hétérogène. A cet effet, deux types de tests seront effectués pour qualifier le rendu des différents algorithmes dans un contexte hétérogène : le premier test cible une hétérogénéité des temps opératoires, le second test une hétérogénéité du nombre d'opérations.

4.5.3.1. Temps opératoires élevés

Le premier test concerne l'augmentation significative du temps opératoire dans un produit existant. Ce test vise à vérifier l'évolution des paramètres optimisés de chaque gamme enveloppe dans le cas typique d'un ordre de fabrication personnalisé qui impliquerait une augmentation du temps opératoire sur une machine donnée.

Pour tester la robustesse des résultats de référence, nous changeons un temps opératoire standard en un temps de traitement significativement plus élevé (15 h au lieu d'une moyenne de 3 h). Nous décidons d'introduire ce changement à différents endroits dans la gamme. En effet, compte tenu du mode de fonctionnement des quatre algorithmes, nous souhaitons également vérifier si cet emplacement a une influence sur le résultat final. Une des vocations de ce test consiste à orienter le choix entre deux algorithmes pour un industriel ou un chercheur qui aurait à faire face à un problème de produits personnalisés par exemple.

Le poids du produit atypique dans le mix modèle est de 5%. Le poids des autres produits est de 19% chacun. Nous simulons 6 scénarii : pour les produits 1, 3 et 6, nous intégrons une opération avec un temps de traitement élevé d'abord au début de la gamme opératoire, puis à la fin.

Tableau 17. Résultats des temps opératoires élevés

Modèle		Référence	Produit 1		Produit 3		Produit 6		Valeurs partagées
Produit atypique		0	Début	Fin	Début	fin	Début	fin	
Deux à deux	ticket ConWip	11 to 14	13 to 15	14 to 15	15 to 16	13 to 15	14 to 16	14 to 16	13 to 15
	taille de lot	2	2	2	2	2	2	2	2
Plus grande occurrence	ticket ConWip	6 to 8	7 to 8	7 to 9	7 to 10	5 to 7	7 to 8	6 to 8	7 to 8
	taille de lot	2	2	2	2	2	2	2	2
Plus grand temps de process	ticket ConWip	7 to 9	8 to 9	8 to 10	8 to 11	7 to 10	10 to 13	7 to 11	N/A
	taille de lot	2	2	2	2	2	2	1 to 2	2
Accordéon	ticket ConWip	6 to 7	7 to 9	6 to 7	7 to 8	5 to 7	6 to 9	7 to 8	7
	taille de lot	2	2	2	2	2	2	2	2

L'algorithme « deux à deux » est plus sensible à l'introduction d'un temps de fonctionnement élevé que les algorithmes de « la plus grande occurrence » et « accordéon ». L'algorithme du « temps opératoire le plus élevé » est plus sensible si le temps est ajouté à la fin de la gamme opératoire du produit que s'il est ajouté au début.

La notion de "valeurs partagées" montre que pour l'algorithme du « temps opératoire le plus élevé », il n'y a pas de valeur partagée pour les tickets ConWip entre tous les scénarii. La « plus grande occurrence » et « accordéon » sont les algorithmes les plus stables.

4.5.3.2. Nombre élevé d'opérations

Une autre hétérogénéité peut provenir de l'introduction d'un produit atypique et par exemple d'un produit complexe qui nécessite plus d'opérations (ici 10 au lieu de 5) avec par exemple des aller-retours au fraisage et à l'usinage. Le poids de ce produit est de 5%. Les autres produits pèsent 19% chacun. Le produit 1 est modifié conformément à ces spécifications.

Tableau 18. Résultats du test avec un nombre élevé d'opérations

Algorithmes		Référence	Nombre élevé d'opérations
Deux à deux	tickets ConWip	11 to 14	21 to 22
	taille de lot	2	2
Plus grande occurrence	ticket ConWip	6 to 8	13 to 16
	taille de lot	2	2
Plus grand temps de process	ticket ConWip	7 to 9	13 to 16
	taille de lot	2 to 3	2
Accordéon	ticket ConWip	6 to 7	12 to 14
	taille de lot	2 to 3	2

Tous les algorithmes sont sensibles à ce changement. Cette conclusion montre l'ampleur de l'impact de la nouvelle gamme allongée d'un produit sur la gamme enveloppe de l'ensemble de produits. Quel que soit l'algorithme, les gammes enveloppes recalculées induisent des paramètres optimisés avec deux fois plus de tickets que la gamme enveloppe de référence.

Synthèse du chapitre 4

Tableau 19. Synthèse

Algorithme	Variation du mix modèle	Localisation de la séquence	Temps de process élevé	Nombre élevé d'opérations
Deux à deux	Sensibilité faible	Sensibilité élevée	Sensibilité élevée avec localisation à la fin de la gamme	Sensibilité
Plus grande occurrence	Sensibilité faible	N/A	Faible sensibilité	Sensibilité
Plus grand temps de process	Sensibilité faible	N/A	Sensibilité élevée avec localisation au début de la gamme	Sensibilité
Accordéon	Sensibilité faible	Sensibilité si le produit avec une séquence différente est au début	Faible sensibilité	Sensibilité

Le chapitre 4 propose une approche de l'optimisation du ConWip dans un environnement multiproduit. L'objectif consiste à fournir aux industriels des outils « conviviaux » et simples pour leur permettre d'optimiser un atelier. Dans la mesure où la méthode pour optimiser un ConWip dans un environnement monoproduit est connue, notre approche consiste à construire une gamme enveloppe pour réduire la complexité du problème multiproduit. Les quatre algorithmes proposés pour construire une gamme enveloppe sont la première contribution présentée ici.

Dans un second temps, le présent chapitre propose une analyse visant à qualifier la pertinence des quatre algorithmes et ainsi aider un décideur à choisir lequel sera le plus pertinent dans le cadre de son besoin spécifique ou du moins à comprendre les forces et les faiblesses des quatre alternatives proposées ici. Dans cette partie, différents résultats sont obtenus grâce à l'utilisation d'un échantillon de données industrielles :

- les quatre algorithmes sont peu sensibles à des variations limitées du mix modèle,
- les algorithmes asymétriques nécessitent une attention particulière à la séquence de produits qui leur est injectée, car celle-ci peut affecter la nature de la gamme enveloppe qui en découlera,

- l'introduction d'un temps de traitement accru dans l'un des produits (simulant par exemple une commande de produits personnalisés) n'a pas le même impact sur les paramètres optimums du ConWip sous-jacent en fonction de l'algorithme choisi,
- l'introduction d'un produit atypique avec un nombre élevé d'opérations dans sa gamme (qui simule par exemple un produit dédié à une zone géographique caractérisée par des exigences normatives renforcées), a un impact significatif sur les paramètres optimisés des quatre gammes enveloppes générées.

Ces quatre ensembles de résultats fournissent une grille de compréhension et une évaluation qualitative des quatre algorithmes générateurs de gammes enveloppe qui peut guider le choix d'un décideur.

Une première piste de recherche permettant de compléter ces résultats pourrait viser à tester l'implémentation réelle d'un ConWip optimisé avec l'utilisation de l'une des quatre gammes enveloppes définies par les algorithmes génératifs. L'objectif poursuivi ici serait d'obtenir un retour d'expérience mesurable sur les contributions apportées ici.

Pour approfondir la recherche, les quatre séries de résultats pourraient également être étendues afin de coller à un plus grand nombre d'environnements industriels et de devenir un outil décisionnel plus exhaustif.

Pour finir, un autre résultat principal pour les industriels consisterait à connaître directement l'impact des changements de mix-modèle sur les performances de l'atelier. Comme il est difficile de tester les changements directement dans l'atelier, une piste de recherche pourrait être l'utilisation de la simulation. Cette capacité à évaluer les scénarii dans une logique de « et que se passerait-il si ? » fait de la simulation une technique très puissante pour ce type d'objectif. En effet, cela permet à un décideur d'évaluer les changements dans une partie de la chaîne de production au sens large et de visualiser l'impact sur la performance. L'idée est de définir les paramètres optimisés de l'atelier, avec le mix modèle initial et grâce à la gamme enveloppe choisie.

Après cela, une bonne option consisterait à intégrer les différents scénarii modifiés dans le simulateur d'atelier et de les tester avec les paramètres ConWip optimisés initiaux et avec les nouveaux paramètres optimaux. En conclusion, les niveaux des indicateurs de performance (donc le niveau de service et de rentabilité) issus des deux simulations (la première avec les paramètres ConWip initiaux, la seconde avec les nouveaux) pourraient être comparés et conduire à une décision du type :

- Le changement est validé sans modification des paramètres ConWip
- Le changement est validé avec modification des paramètres ConWip
- Le changement n'est pas validé en raison de son ratio coût/gain insuffisamment favorable

5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

5.1. Apports
5.2. Conclusions
5.3. Perspectives

Dans le contexte mondialisé de type « VUCA World » évoqué en introduction, l'innovation et l'agilité sont deux piliers absolument nécessaires à la réussite voire à la survie d'une entreprise industrielle. **Nous avons par conséquent choisi de positionner nos recherches sur le plan de l'innovation en matière de gestion des flux au service de l'agilité de l'entreprise.** Dans cette logique, nous avons naturellement choisi de nous intéresser à un outil dit de gestion des flux ou de contrôle de la production (PCS) agile, au sujet duquel les pistes d'innovations sont nombreuses, à savoir le ConWip.

5.1 APPORTS

Afin de définir notre problématique de la manière la plus pertinente, nous avons choisi de procéder à un état de l'art suivi d'une étude complète des pistes de recherche au sujet du ConWip et mises en lumière par la littérature étudiée à travers ledit état de l'art. Ces deux premières phases nous ont conduits à définir précisément la thématique de cette thèse et la question de recherche associée :

- Thématique : Optimisation du ConWip dans un environnement multiproduit
- Question de recherche : Comment peut-on déterminer quels paramètres utiliser pour dimensionner un système ConWip dans un environnement multiproduit en mouvement ?

Elles ont également conduit à un apport matérialisé par la construction d'un processus d'aide à la décision et à la mise en œuvre à l'attention des industriels et des chercheurs. Ce dernier vise à apporter une méthodologie pour mettre en œuvre un ConWip.

Ensuite, pour contribuer à la résolution de la question de recherche retenue, nous avons utilisé le processus en question, issu de notre état de l'art et représenté par le schéma ci-dessous :

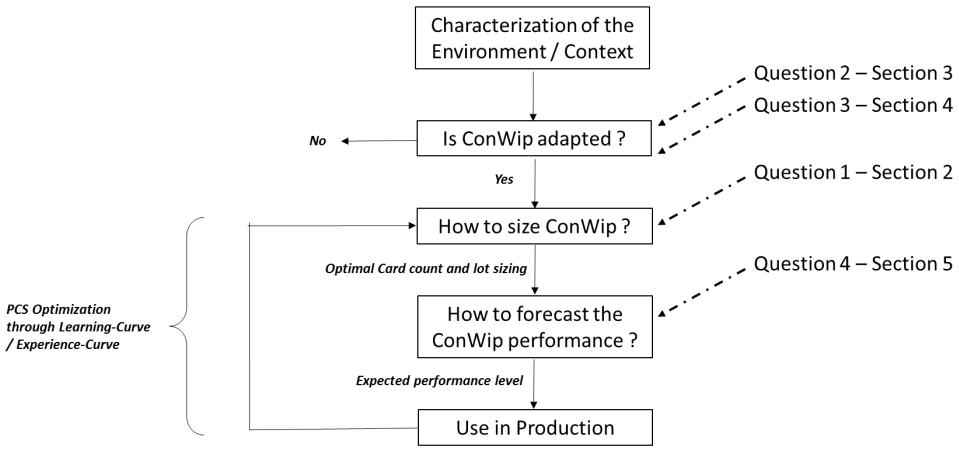

Figure 20. Processus de résolution de la question de recherche

Au sein de ce processus, nous nous sommes attachés à la question du dimensionnement qui représente le point bloquant de la problématique. Pour apporter une contribution à la résolution du problème posé, quatre algorithmes ont été conçus. Ils permettent, à partir d'un jeu de gammes opératoires et des poids des produits dans le mix modèle, de construire une gamme enveloppe représentative. Cet apport de la présente thèse est schématisé, en gras, dans la figure 21.

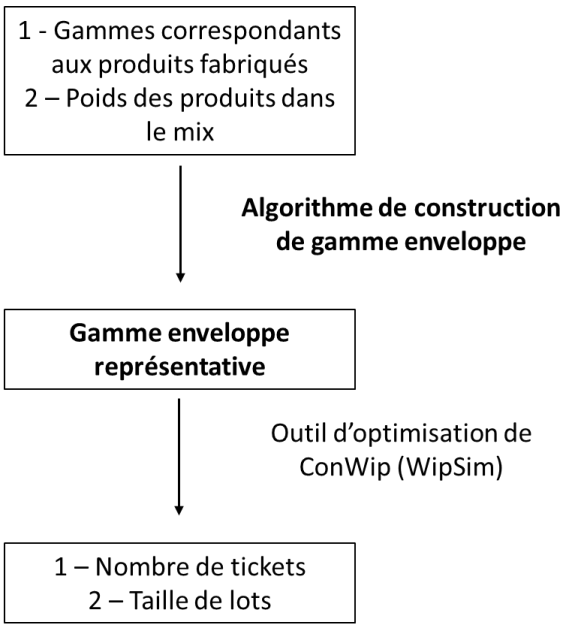

Figure 21. Schéma de résolution

5.2 CONCLUSIONS

Les tests effectués sur les quatre algorithmes permettent de mettre en évidence les résultats suivants :

- les quatre algorithmes sont peu sensibles à des variations limitées du mix modèle,
- les algorithmes asymétriques nécessitent une attention particulière à la séquence des produits qui leur est injectée, car celle-ci peut affecter la nature de la gamme enveloppe qui en découlera,
- l'introduction d'un temps de traitement accru dans l'un des produits (simulant par exemple une commande de produits personnalisés) n'a pas le même impact sur les paramètres optimums du ConWip sous-jacent en fonction de l'algorithme choisi,
- l'introduction d'un produit atypique avec un nombre élevé d'opérations dans sa gamme (qui simule par exemple un produit dédié à une zone géographique caractérisée par des exigences normatives renforcées), a un impact significatif sur les paramètres optimisés des quatre gammes enveloppes générées.

5.3 PERSPECTIVES

Les perspectives de recherches offertes par ces résultats sont multiples.

La première consisterait sans doute à tester sur un ou plusieurs environnements industriels les gammes enveloppes définies par les quatre algorithmes afin de bénéficier d'un retour d'expérience industriel.

Ensuite, les résultats obtenus montrent que les quatre algorithmes affichent des points forts et des points faibles différents. Il en découle par conséquent qu'ils peuvent, chacun, correspondre à des environnements différents. La piste de recherche induite reviendrait donc à définir plusieurs catégories d'environnements industriels et de les relier à l'algorithme le plus adapté. En fonction des résultats obtenus par cette seconde piste de recherche, un travail de recherche permettant de déterminer un ou plusieurs algorithmes complémentaires pourrait être mené dans l'objectif de garantir une relation bijective entre les typologies d'environnements industriels et le jeu d'algorithmes disponibles. Pour compléter cette approche, une série de tests de sensibilités additionnels pouvant chacun correspondre à une typologie d'environnement industriel pourra être construite afin de qualifier les algorithmes.

L'ensemble de ces perspectives visent à optimiser un PCS simple dans l'objectif de piloter un environnement complexe et mouvant. Cette approche qui, d'une manière générale, vise à rendre précis, adapté voire millimétré, un concept simple pour résoudre un problème complexe et mobile est particulièrement adaptée aux problématiques industrielles d'aujourd'hui.

Les solutions auxquelles elle conduit ouvrent la voie à une capacité d'adaptation et d'innovation accrues afin de développer l'agilité requise face à une réalité industrielle dans laquelle *« **C'est l'instable qui est le fixe. C'est sur l'incertain qu'il faut baser** ». Eugène Delacroix*

6. BIBLIOGRAPHIE

Aglan, Canan, and Mehmet Bulent Durmusoglu. 2015. "Lot-Splitting Approach of a Hybrid Manufacturing System under CONWIP Production Control: A Mathematical Model." *International Journal of Production Research* 53 (5): 1561–83.

Ajorlou, S., Shams, I. 2013. Artificial bee colony algorithm for CONWIP production control system in a multi-product multi-machine manufacturing environment. *Journal of Intelligent Manufacturing,* 24(6), 1145-1156.

Bahaji, N, and ME Kuhl. 2008. "A Simulation Study of New Multi-Objective Composite Dispatching Rules, CONWIP, and Push Lot Release in Semiconductor Fabrication." *International Journal of Production Research* 46 (14): 3801–24.

Baynat, Bruno, John A Buzacott, and Yves Dallery. 2002. "Multiproduct Kanban-like Control Systems." *International Journal of Production Research* 40 (16): 4225–55.

Baynat, Bruno, Yves Dallery, Maria Di Mascolo, and Yannick Frein. 2001. "A Multi-Class Approximation Technique for the Analysis of Kanban-like Control Systems." *International Journal of Production Research* 39 (2): 307–28.

Belisário, Lorena Silva, Nesrine Azouz, and Henri Pierreval. 2015. "Adaptive ConWIP: Analyzing the Impact of Changing the Number of Cards." In *Industrial Engineering and Systems Management (IESM), 2015 International Conference on*, 930–37. IEEE.

Belisário, Lorena Silva, and Henri Pierreval. 2015. "Using Genetic Programming and Simulation to Learn How to Dynamically Adapt the Number of Cards in Reactive Pull Systems." *Expert Systems with Applications* 42 (6): 3129–41.

Bertolini, Massimo, Giovanni Romagnoli, and Francesco Zammori. 2015. "Assessing Performance of Workload Control in High Variety Low Volumes MTO Job Shops: A Simulative Analysis." In *Industrial Engineering and Systems Management (IESM), 2015 International Conference on*, 362–70. IEEE.

Bonvik, Asbjoern M, CE Couch, and Stanley B Gershwin. 1997. "A Comparison of Production-Line Control Mechanisms." *International Journal of Production Research* 35 (3): 789–804.

Bonvik, Asbjoern M, Yves Dallery, and Stanley B Gershwin. 2000. "Approximate Analysis of Production Systems Operated by a CONWIP/finite Buffer Hybrid Control Policy." *International Journal of Production Research* 38 (13): 2845–69.

Burlat, Patrick. 2015. *Méthodes Concrètes de Conception de Système de Pilotage de Ligne En Mode CONWIP*. Techniques de l'Ingénieur.

Braglia, M., Frosolini, M., Gabbrielli, R., Zammori, F. 2011. CONWIP card setting in a flow-shop system with a batch production machine. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 2(1): 1-18.

Cao, Dong, and Mingyuan Chen. 2005. "A Mixed Integer Programming Model for a Two Line CONWIP-Based Production and Assembly System." *International Journal of Production Economics* 95 (3): 317–26.

Child, Peter, Raimund Diederichs, Falk-Hayo Sanders, and Stefan Wisniowski. 1991. "SMR Forum: The Management of Complexity." *Sloan Management Review* 33 (1): 73.

Crop, F, T Lacornerie, X Mirabel, and E Lartigau. 2015. "Workflow Optimization for Robotic Stereotactic Radiotherapy Treatments: Application of Constant Work In Progress Workflow." *Operations Research for Health Care* 6: 18–22.

Dallasega, Patrick, Erwin Rauch, and Dominik T Matt. 2015. "Sustainability in the Supply Chain through Synchronization of Demand and Supply in ETO-Companies." *Procedia CIRP* 29: 215–20.

Economopoulos, Angelos A, and Vassilis S Kouikoglou. 2008. "Analysis of a Simple CONWIP System with Impatient Customers." In *Automation Science and Engineering, 2008. CASE 2008. IEEE International Conference on*, 291–96. IEEE.

Eng, Chong Kuan, and Lim Ke Sin. 2013. "CONWIP Based Control of a Semiconductor End of Line Assembly." *Procedia Engineering* 53 (January): 607–15.

Framinan, Jose M, Pedro L Gonzalez, and Rafael Ruiz-Usano. 2003. "The CONWIP Production Control System: Review and Research Issues." *Production Planning & Control* 14 (3): 255–65.

Framinan, Jose M, Rafael Ruiz-Usano, and Rainer Leisten. 2001. "Sequencing CONWIP Flow-Shops: Analysis and Heuristics." *International Journal of Production Research* 39 (12): 2735–49.

Framinan, J. M., Gonzalez, P. L., Ruiz-Usano, R. 2006. Dynamic card controlling in a Conwip system. International *Journal of Production Economics*, 99(1): 102-116.

Gastermann, Bernd, Markus Stopper, Franz Luftensteiner, and Branko Katalinic. 2014. "Implementation of a Software Prototype with ConWIP Characteristics for Production Planning and Stock Management." *Procedia Engineering* 69: 423–32.

Germs, Remco, and Jan Riezebos. 2010. "Workload Balancing Capability of Pull Systems in MTO Production." *International Journal of Production Research* 48 (8): 2345–60.

Gong, Qiguo, Yuru Yang, and Shouyang Wang. 2014. “Information and Decision-Making Delays in MRP, KANBAN, and CONWIP.” *International Journal of Production Economics* 156: 208–13.

González-r, Pedro L, José M Framinan, and Henry Pierreval. 2012. “Token-Based Pull Production Control Systems: An Introductory Overview.” *Journal of Intelligent Manufacturing* 23 (1): 5.

Hallihan, A, P Sackett, and GM Williams. 1997. “JIT Manufacturing: The Evolution to Animplementation Model Founded in Current Practice.” *International Journal of Production Research* 35 (4): 901–20.

Hall, R. 1981. “Driving the Productivity Machine: Production, Planning and Control in Japan American Production and Inventory Control Society.” *Falls Church, Virginia*.

Harrod, Steven, and John J Kanet. 2013. “Applying Work Flow Control in Make-to-Order Job Shops.” *International Journal of Production Economics* 143 (2): 620–26.

Helber, Stefan, Katja Schimmelpfeng, and Raik Stolletz. 2011. “Setting Inventory Levels of CONWIP Flow Lines via Linear Programming.” *Business research* 4 (1):98-115

Herer, Yale T, and Levi Shalom. 2000. “The Kanban Assignment problem–A Non-Integral Approach.” *European Journal of Operational Research* 120 (2): 260–76.

Hopp, Wallace J, and Mark L Spearman. 1991. “Throughput of a Constant Work in Process Manufacturing Line Subject to Failures.” *THE INTERNATIONAL JOURNAL OF PRODUCTION RESEARCH* 29 (3): 635–55.

Hopp, W. J., and M. L. Spearman. 1996. Factory Physics: Foundations of Factory Management. Inrwin/McGraw Hill, Chicago, IL.

Hopp, Wallace J, and ML Roof. 1998. “Setting WIP Levels with Statistical Throughput Control (STC) in CONWIP Production Lines.” *International Journal of Production Research* 36 (4): 867–82.

Hopp, Wallace J, and Mark L Spearman. 2011. *Factory Physics*. Waveland Press.

Huang, Guodong, Jie Chen, Xiuli Wang, and Yiqun Shi. 2015. “A Simulation Study of CONWIP Assembly with Multi-Loop in Mass Production, Multi-Products and Low Volume and OKP Environments.” *International Journal of Production Research* 53 (14): 4160–75.

Huang, Guodong, Jie Chen, Xiuli Wang, Yiqun Shi, and Houping Tian. 2017. “From Loop Structure to Policy-Making: A CONWIP Design Framework for Hybrid Flow Shop Control in One-of-a-Kind Production Environment.” *International Journal of Production Research* 55 (12): 3374–91.

Huyet, A. L., Paris, J. L. 2005. Optimisation intelligente via simulation et extraction de connaissances. *Journal européen des systèmes automatisés*, 39(5-6): 637-656.

Ip, WH, Min Huang, Kai-Leung Yung, Dingwei Wang, and Xingwei Wang. 2007. "CONWIP Based Control of a Lamp Assembly Production Line." *Journal of Intelligent Manufacturing* 18 (2): 261–71.

Jackson, James R. 1963. "Jobshop-like Queueing Systems." *Management Science* 10 (1): 131–42.

Jaegler, Yann, Patrick Burlat, and Samir Lamouri. 2016. "The ConWip Production Control System: A Literature Review." In *The International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain (ILS International Conference)*.

Jaegler, Yann, Anicia Jaegler, Patrick Burlat, Samir Lamouri, and Damien Trentesaux. 2017. "The ConWip Production Control System: A Systematic Review and Classification." *International Journal of Production Research* 0 (0): 1–22. doi:10.1080/00207543.2017.1380325.

Jaegler, Yann, Anicia Jaegler, Damien trentesaux, Patrick Burlat, and Samir Lamouri. 2017. "The CONWIP Production Control System: Classification and Discussion of Current and Future Research Avenues." *Journal Européen Des Systèmes Automatisés* 50 (3-6).

Jaegler, Y., Lamouri, S., Trentesaux, D., Burlat, P., & Jaegler, A. 2018. Generic Routings for ConWip Sizing in a Multi-product Environment. In *Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing*. 447-460. Springer, Cham.

Jing-Wen Li. 2010." Comparing Kanban with CONWIP in a make-to-order environment supported by JIT practices", Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers, 28:1: 72-88.

Jodlbauer, H, and A Huber. 2008. "Service-Level Performance of MRP, Kanban, CONWIP and DBR due to Parameter Stability and Environmental Robustness." *International Journal of Production Research* 46 (8): 2179–95.

Khojasteh-Ghamari, Y. 2009. A performance comparison between kanban and CONWIP controlled assembly systems. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 20(6): 751-760.

Korugan, Aybek, and Surendra M Gupta. 2014. "An Adaptive CONWIP Mechanism for Hybrid Production Systems." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 74 (5-8): 715–27.

Lavoie, Philippe, Ali Gharbi, and J-P Kenne. 2010. “A Comparative Study of Pull Control Mechanisms for Unreliable Homogenous Transfer Lines.” *International Journal of Production Economics* 124 (1): 241–51.

Li, Jing-Wen. 2010. “Simulation Study of Coordinating Layout Change and Quality Improvement for Adapting Job Shop Manufacturing to CONWIP Control.” *International Journal of Production Research* 48 (3): 879–900.

Little, John DC. 1961. “A Proof for the Queuing Formula: L= Λ W.” *Operations Research* 9 (3): 383–87.

MacDuffie, John Paul, Kannan Sethuraman, and Marshall L Fisher. 1996. “Product Variety and Manufacturing Performance: Evidence from the International Automotive Assembly Plant Study.” *Management Science* 42 (3): 350–69.

Marek, Richard P, Debra A Elkins, and Donald R Smith. 2001. “Manufacturing Controls: Understanding the Fundamentals of Kanban and CONWIP Pull Systems Using Simulation.” In *Proceedings of the 33nd Conference on Winter Simulation*, 921–29. IEEE Computer Society.

Mhada, Fatima, and Roland Malhamé. 2011. “Approximate Performance Analysis of CONWIP Disciplines in Unreliable Non Homogeneous Transfer Lines.” *Annals of Operations Research* 182 (1): 213–33.

Olaitan, Oladipupo, Quan Yu, and Erlend Alfnes. 2017. “Work In Process Control for a High Product Mix Manufacturing System.” *Procedia CIRP* 63: 277–82.

Onyeocha, Chukwunonyelum E, Joseph Khoury, and John Geraghty. 2013. “A Comparison of Kanban-like Control Strategies in a Multi-Product Manufacturing System under Erratic Demand.” In *Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference: Simulation: Making Decisions in a Complex World*, 2730–41. IEEE Press.

Onyeocha, Chukwunonyelum Emmanuel, Jiayi Wang, Joseph Khoury, and John Geraghty. 2015. “A Comparison of HK-CONWIP and BK-CONWIP Control Strategies in a Multi-Product Manufacturing System.” *Operations Research Perspectives* 2: 137–49.

Ounnar, Fouzia, and Patrick Pujo. 2012. “Pull Control for Job Shop: Holonic Manufacturing System Approach Using Multicriteria Decision-Making.” *Journal of Intelligent Manufacturing* 23 (1): 141–53.

Papadopoulou, Theopisti C. 2013. “Application of Lean Scheduling and Production Control in Non-Repetitive Manufacturing Systems Using Intelligent Agent Decision Support.” Brunel University School of Engineering and Design PhD Theses.

Park, Chan-Woo , Lee, Hyo-Seong , 2013, "Performance evaluation of a multi-product CONWIP assembly system with correlated external demands", International Journal of Production Economics, 144(1): 334-344,

Parvin, Hoda, Mark P Van Oyen, Dimitrios G Pandelis, Damon P Williams, and Junghee Lee. 2012. “Fixed Task Zone Chaining: Worker Coordination and Zone Design for Inexpensive Cross-Training in Serial CONWIP Lines.” *IIE Transactions* 44 (10): 894–914.

Pergher, Isaac, and Guilherme Luís Roehe Vaccaro. 2014. “Work in Process Level Definition: A Method Based on Computer Simulation and Electre Tri.” *Production* 24 (3): 536–47.

Pettersen, J.-A., Segerstedt, A., 2009. Restricted work-in-process: a study of differences between Kanban and CONWIP. International Journal of Production Economics, 118 (1): 199–207.

Pierreval, Enri, Antoine Daures, Thomas Both, Stéphane Szimczak, Pedro Gonzalez, and Jose Framinan. 2013. “A Simulation Optimization Approach for Reactive ConWIP Systems.” In *Modelling and Simulation (EUROSIM), 2013 8th EUROSIM Congress on*, 415–20. IEEE.

Prakash, Joshua, and Chin Jeng Feng. 2011. “A Comparison of Push and Pull Production Controls under Machine Breakdown.” *International Journal of Business Science & Applied Management* 6 (3): 58–70.

Prakash, Joshua, and Jeng Feng Chin. 2015. “Modified CONWIP Systems: A Review and Classification.” *Production Planning & Control* 26 (4): 296–307.

Prakash, Joshua, and Jen feng Chin. 2017. “Effects of Inventory Classifications on CONWIP System: A Case Study.” *Journal of Management Analytics*, 1–25.

Romagnoli, Giovanni. 2015. “Design and Simulation of CONWIP in the Complex Flexible Job Shop of a Make-To-Order Manufacturing Firm.” *International Journal of Industrial Engineering Computations* 6 (1): 117–34.

Ryan, Sarah M, Bruno Baynat, and F FRED CHOOBINEH. 2000. “Determining Inventory Levels in a CONWIP Controlled Job Shop.” *IIE Transactions* 32 (2): 105–14.

Ryan, Sarah M, and Jumpol Vorasayan. 2005. “Allocating Work in Process in a Multiple-Product CONWIP System with Lost Sales.” *International Journal of Production Research* 43 (2): 223–46.

Sastry, GG, and R Garg. 2017. “Analysis of Single Flow Line Multi Stage Multi-Product Pull Control Systems.”*Journal of scientific & industrial research* 76: 289-293

Satyam, Kumar, Krishnamurthy, Ananth. 2008." Performance evaluation of a multi-product system under CONWIP control". IIE Transactions 40(3): 252-264.

Satyam, Kumar, and Ananth Krishnamurthy. 2013. “Performance Analysis of CONWIP Systems with Batch Size Constraints.” *Annals of Operations Research* 209 (1): 85–114.

Schulze, Mike, Henrik Nehler, Mikael Ottosson, and Patrik Thollander. 2016. “Energy Management in Industry–a Systematic Review of Previous Findings and an Integrative Conceptual Framework.” *Journal of Cleaner Production* 112: 3692–3708.

Spearman, Mark L., David L. Woodruff, and Wallace J. Hopp. 1990. “CONWIP: A Pull Alternative to Kanban.” *International Journal of Production Research* 28 (5): 879.

Spearman, Mark L, and Michael A Zazanis. 1992. “Push and Pull Production Systems: Issues and Comparisons.” *Operations Research* 40 (3): 521–32.

Srinivasan, Mandyam M, Steven J Ebbing, and Alan T Swearingen. 2003. “Woodward Aircraft Engine Systems Sets Work-in-Process Levels for High-Variety, Low-Volume Products.” *Interfaces* 33 (4): 61–69.

Stevenson, Mark, Linda C Hendry, and BG Kingsman. 2005. “A Review of Production Planning and Control: The Applicability of Key Concepts to the Make-to-Order Industry.” *International Journal of Production Research* 43 (5): 869–98.

Suri, Rajan. 1998. *Quick Response Manufacturing: A Companywide Approach to Reducing Lead Times*. CRC Press.

Takahashi, Katsuhiko, and Nobuto Nakamura. 2002. “Comparing Reactive Kanban and Reactive CONWIP.” *Production Planning & Control* 13 (8): 702–14.

Takahashi, Katsuhiko, Daisuke Hirotani, and others. 2005. “Comparing CONWIP, Synchronized CONWIP, and Kanban in Complex Supply Chains.” *International Journal of Production Economics* 93: 25–40.

Tardif, Valerie, and Lars Maaseidvaag. 2001. “An Adaptive Approach to Controlling Kanban Systems.” *European Journal of Operational Research* 132 (2): 411–24.

Thürer, M., Land, M. J., Stevenson, M. 2014. Card-based workload control for job shops: Improving COBACABANA. *International Journal of Production Economics*, 147: 180-188.

Thürer, Matthias, Nuno O Fernandes, Mark Stevenson, and Ting Qu. 2017. “On the Backlog-Sequencing Decision for Extending the Applicability of ConWIP to High-Variety Contexts: An Assessment by Simulation.” *International Journal of Production Research* 55 (16): 4695–4711.

Wang, Yanhong, Jun Cao, and Lixin Kong. 2009. “Hybrid Kanban/Conwip Control System Simulation and Optimization Based on Theory of Constraints.” In *Intelligent Computing and Intelligent Systems, 2009. ICIS 2009. IEEE International Conference on*, 2: 666–70. IEEE.

Wang, Yan-Hong, Lin Wang, and Cui Yue. 2013. “Simulation on the Push/Conwip Control Mode for Manufacturing Process.” In *Intelligent Networks and Intelligent Systems (ICINIS), 2013 6th International Conference on*, 82–85. IEEE.

Zhang, Wen, and Mingyuan Chen. 2001. “A Mathematical Programming Model for Production Planning Using CONWIP.” *International Journal of Production Research* 39 (12): 2723–34.

Ziengs, Nick, Jan Riezebos, and Remco Germs. 2012. “Placement of Effective Work-in-Progress Limits in Route-Specific Unit-Based Pull Systems.” *International Journal of Production Research* 50 (16): 4358–71.

OPTIMISATION DU CONWIP DANS UN ENVIRONNEMENT MULTIPRODUIT

RESUME : Au cours de la dernière décennie, le système de contrôle de production (PCS) Constant Work In Progress (CONWIP) a été étudié par un nombre croissant de publications. Compte tenu des défis industriels actuels, tels que la nécessité de s'adapter, la personnalisation croissante des produits, la réduction des délais et l'importance grandissante du service rendu aux clients, le ConWip semble être un PCS efficace et agile pour les industriels. Cette thèse débute par une revue systématique des travaux sur le ConWip remontant à 2003 basée sur une méthode de classification originale. Cette méthode permet de catégoriser les papiers qui se concentrent sur le dimensionnement, la performance, le contexte d'implémentation et la comparaison avec d'autres PCS. En plus de proposer une clé de lecture pour interpréter les approches de recherche, les critères considérés répondent à des questions sur la façon de mettre en œuvre, la façon d'optimiser et les raisons pour lesquelles utiliser le ConWip. Une étude sur les pistes de recherche proposées ou applicables au ConWip a ensuite permis de mettre en évidence les plus prometteuses et d'en extraire les principales tendances. L'objectif consiste ici à mettre à jour les lacunes de la recherche existante sur le ConWip. L'une d'entre elles amène à des questions clés liées à la mise en œuvre du ConWip dans un environnement caractérisé par un mix produit élevé et/ou par un mix gamme opératoire élevé. Dans ce contexte, quatre algorithmes qui génèrent différentes gammes génériques sont ensuite présentés. Ces gammes, appelées « gammes enveloppes » sont implémentées dans Wipsim, un outil d'ingénierie utilisé dans les projets de conception et d'amélioration des lignes d'assemblage ConWip, qui permet de calculer les paramètres ConWip optimisés pour chacune des gammes. Un échantillon de données, dérivé d'un cas industriel, est utilisé pour tester les quatre algorithmes. Nous les comparons à travers leur sensibilité au mix produit et selon l'impact induit par l'introduction de différents produits atypiques dans le mix. Nos expériences montrent que nos algorithmes génèrent des gammes enveloppes pertinentes et aident les praticiens à choisir le plus adapté à leur contexte spécifique.

Mots clés : ConWip, SCP, flux poussé, flux tiré, gamme, multiproduit

CONWIP OPTIMIZATION IN A MULTIPRODUCT ENVIRONMENT

ABSTRACT: In the past decade, a growing body of literature has investigated the CONstant Work In Progress (ConWip) production control system (PCS). In view of the current industrial challenges entailing adaptability, product customization, decreasing lead times and customer satisfaction, ConWip seems to be an effective and adaptive PCS for manufacturers. A ConWip systematic review dating back to 2003 provides a guide for understanding through an original classification method. This method enables the differentiation of papers that concentrate on ConWip sizing, performance and context as well as a comparison with other PCSs. In addition to providing a key to interpreting the research approaches, the criteria considered answers questions on how to implement, how to optimize and why and when to use ConWip. The survey of research avenues proposed or applicable to CONWIP classify them, highlight the most promising and extract the main trends. The final aim is to provide some gaps. One of the them deals with key questions related to the implementation of ConWip in a high product mix and/or high routing mix environment. Four algorithms that generate different generic routings are presented. These routings are implemented into Wipsim, an engineering tool used in projects to design and improve ConWip assembly lines, which allows the optimized ConWip parameters for each routing to be calculated. A sample of data, derived from an industrial case, is used to test the four models. We compare them via their sensitivity to the mix product and through the impact of the introduction of different, atypical products. Our experiments show that our algorithms generated worthwhile generic routings and help practitioners choose among them, depending on a specific context.

Keywords : ConWip, production control systems, push/pull systems, routing, multi-product

ARTS ET MÉTIERS ParisTech

ParisTech
INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
PARIS INSTITUTE OF TECHNOLOGY