

Rôle de la localisation du point de découplage au sein d'une Supply Chain dans le cadre de la production de masse

Benjamin SCHICK, Master Recherche Sciences de la Décision et Management des Risques Arts et Métiers ParisTech – IAE Paris-Sorbonne : benjamin.schick@gadz.org

Résumé

Le Supply Chain Management est désormais un pôle stratégique pour les organisations. Les industriels doivent pouvoir produire plus vite, mieux et sur mesure. La notion de point de découplage, ou encore de point de pénétration de la demande client, correspond à la barrière existante entre système de production en flux poussé et système de production en flux tiré. On peut aussi le définir comme la séparation entre production « Lean » et production « Agile ». Ainsi, les deux types de production qui encadrent cette barrière stratégique possèdent chacun leurs avantages et inconvénients. Dans cette étude, une méthode simple de simulation est proposée. Utilisant le logiciel R, une chaîne de production linéaire et équilibrée est modélisée et les modifications du lieu du point de découplage sont étudiées permettant ainsi de mettre en lumière le rôle stratégique de cette localisation en terme de coût de détention des stocks et de taux de service. Dès lors, deux résultats sont présentés et débattus : la valeur totale des stocks augmente lorsque le point de découplage est déplacé en amont de la chaîne de production et, le taux de service a tendance à chuter lorsque le point de découplage se situe trop en aval. En conclusion, l'importance des nouvelles pratiques dans l'industrie 4.0 est mise en évidence et différentes pistes sont données pour améliorer le modèle et y intégrer les nombreuses données inhérentes aux nouveaux modes de gestion et de production.

Mots-clés

Supply Chain – Point de découplage – Point de différenciation – Modélisation – Recherche opérationnelle – Production de masse - Simulation

1 Introduction

Dans un contexte industriel ayant tendance à se complexifier, le design au plus fin des Supply Chain est un élément clé de compétitivité (Graves et Willems 2000). Aujourd'hui, les Supply Chains, que ce soit du point de vue des flux physiques ou d'informations, s'allongent en raison de leur complexité : nombre de sous-traitants, nombre d'opérations, diversité de la demande, etc. De plus, la hausse des exigences des clients s'accompagne d'une demande grandissante en personnalisation et marquée par des délais raccourcis. Ainsi, il devient indispensable d'optimiser ses coûts logistiques. (Christopher 2000) explique que le Supply Chain Management (SCM) a été reconnu comme un élément compétitif clé sur les marchés.

En effet, longtemps restreint au cadre de la logistique, le SCM a depuis le début de la mondialisation endossé un rôle stratégique tant sur les plans de flux physiques que de flux d'informations et financiers dans le cadre d'entreprises et d'organisations étendues (KYU et AMRAE 2017). Il est indispensable de s'intéresser aux procédés de production et à leurs interactions car

l'enjeu actuel de l'industrie de customisation de masse est de produire unitairement avec des coûts comparables à ceux de la production en série. A travers le principe de point de découplage, ou encore de point de découplage de la demande client (CODP), nous voulons étudier un aspect du design des Supply Chain et montrer l'intérêt d'une telle étude en matière de coûts et de service client.

Ainsi dans une première partie, nous définissons les notions de point de découplage et de point de différenciation en mettant en évidence leurs différences. Par la suite, nous présentons les modèles d'optimisation de localisation du point de découplage existant et nous nous en inspirons pour établir notre modèle. Dans une troisième partie, à l'aide du logiciel R, nous mettons en place notre modèle et enfin une discussion des résultats obtenus sera menée.

2 Revue de littérature

2.1 Le cadre général de la Supply Chain actuelle

La transformation digitale de l'industrie impacte fortement les produits et les chaînes de valeur. Ces

changements répondent à des évolutions de paradigmes et de business model. La réussite de leur mise en œuvre est dès lors liée à une bonne maîtrise de l'intégration des nouvelles solutions collaboratives dites « 4.0 ». Ainsi, (Lee 2004) établit que les meilleures Supply Chain ne sont pas seulement rapides et rentables mais également agiles et adaptables. Elles veillent à ce que les enjeux de l'entreprise soient préservés et à ce que ses objectifs soient réalisés. A cette fin, (Waller et Fawcett 2013) pensent que pour bénéficier de la révolution big-data en cours, les chercheurs et managers de la Supply Chain doivent comprendre et adopter les data sciences et analyses prédictives dans leur processus de prise de décision. Par conséquent, des modèles conceptuels et opérationnels devront être mis en place pour assurer la pérennité et l'optimisation des processus utilisés. On constate d'ailleurs que de nombreuses entreprises cherchent à incorporer des modèles d'analyses et d'optimisation des stocks et des flux à leur ERP.

2.2 Définition du point de découplage

La Supply Chain est ainsi devenue un maillon stratégique de l'entreprise qui doit savoir aligner ses différentes ressources, ses produits et le marché. (Stavrulaki et Davis 2010) mettent en évidence l'absence d'analyses, du point de vue du fabricant, de la manière dont les caractéristiques du produit devraient être corrélées non seulement aux processus de production, mais aussi aux processus logistiques, et à partir de ces caractéristiques, quelles sont les priorités concurrentielles du fabricant et de son approvisionnement. Ainsi, dans cette recherche perpétuelle d'optimisation des coûts et du service client, le couple produit / Supply Chain doit être considéré au même titre que les ingénieurs intègrent naturellement le couple produit / procédé.

Il devient nécessaire, si ce n'est incontournable, pour les chaînes logistiques globales d'intégrer la demande réelle dans leurs procédés pour compléter les prévisions de vente (Christopher 1999). Le lieu de cette intégration de la demande dans les chaînes logistiques est appelé point de découplage. Nombreux sont les auteurs, qui, comme (Olhager 2003) et (van Donk 2001), définissent dans une première approche le point de découplage comme le point de la supply chain à partir duquel le produit est directement lié à un client spécifique. C'est-à-dire, comme l'expliquent (de Treville, Shapiro, et Hameri 2004), qu'une chaîne d'approvisionnement donnée

peut être partitionnée en une chaîne amont axée sur l'intégration de l'offre (upstream process) et une chaîne en aval focalisée sur l'intégration de la demande (downstream process) ; la frontière entre ces deux chaînes conceptuelles est alors le point de découplage. (Ji, Qi, et GU 2007) et (Olhager 2010) utilisent d'ailleurs le terme de point de pénétration de l'ordre de commande (CODP) pour souligner la barrière conceptuelle que représente une telle notion, qui peut aussi être perçue comme la frontière entre production Lean et production Agile.

En effet, (Christopher 2000) affirme que « *le défi du SCM est de chercher à développer des stratégies «lean» jusqu'au point de découplage et des stratégies «agiles» au-delà de ce point* ».

Il convient alors de planifier la partie amont car, couplée avec les grands principes du Lean, elle permet une optimisation de l'upstream process. En effet, la recherche de l'excellence opérationnelle locale incarnée dans le Lean s'avère efficace lorsque l'on maîtrise intégralement ce que l'on souhaite produire. Ainsi, le Lean est une pratique tout à fait cohérente avec une production en flux poussé.

Cependant des approches telles que le Vendor Managed Inventory (VMI), décrite par (Disney et Towill 2003), montrent que le Lean n'est pas une solution parfaitement adaptée aux contraintes de la Supply Chain et possède en effet des inconvénients. Par exemple, minimiser tous les stocks d'une chaîne peut causer une rupture, entraîner des commandes spécifiques et donc augmenter les coûts de fonctionnement. Autrement dit, en asservissant le stock client, en prenant à sa charge sa disponibilité, le fournisseur sera en mesure de l'augmenter, contredisant les principes du Lean tel qu'ils sont souvent appliqués, pour palier à un futur défaut de sa part. Dès lors, le VMI permettra une gestion mutualisée des stocks, et non pas un Lean local, permettant, entre autre, une réduction de l'effet bullwhip et ainsi une plus grande stabilité de la supply chain. En d'autres termes, le VMI peut être vu comme un asservissement des supply chains permettant une meilleure intégration des différentes parties prenantes au sein de l'organisation.

Le Lean en pratique amont du point de découplage sera relayé en aval de ce point par la notion d'agilité. Cette dernière n'a été que récemment prise en compte dans la mise en place des supply chain, car précédée par la notion de résilience (KYU et AMRAE 2017) ; (Fisher 1997) met en évidence dès la fin du XXème siècle la différence entre une supply chain résiliente et une supply chain sensible au

marché. La première est apte à résister à de nombreux chocs, des crises majeures telles qu'une rupture prolongée d'approvisionnement, et permet de livrer les biens dans la bonne quantité, au bon endroit, au bon moment et avec des coûts bien gérés, (Christopher et Peck 2004). La seconde sait répondre aux exigences du marché, par nature, comme le décrivent (Christopher, Lowson, et Peck 2004) sous le terme d'agilité.

Cette barrière conceptuelle entre Lean et Agilité, ou encore upstream et downstream process, incarnée dans le point de découplage, peut aussi être abordée de manière plus pragmatique. En effet, la littérature présente unanimement le point de découplage comme la frontière entre production poussée –Push- et production tirée –Pull- ; (van Donk 2001), (JI, Qi, et GU 2007), (Olhager 2010). D'une manière plus opérationnelle, il s'agit d'un stock stratégique séparant production Make-to-Stock –MTS- (production prévisionnelle ou production pour stock) et Make-to-Order –MTO- (production liée à la demande client). Comme (Cid Yanez et al. 2009) le soulignent, la question à se poser est : Où positionner la meilleure interface push / pull dans la supply chain, pour optimiser le compromis coût / réactivité ?

(Olhager 2003), auteur repris unanimement dans la littérature, rappelle que (Fisher 1997) met en évidence la différence entre une supply chain efficiente et une supply chain sensible au marché. De plus, Olhager déclare que le processus de production est fortement lié au produit ainsi qu'au marketing autour de celui-ci. Deux concepts de compétitivité sont rappelés : les arguments nécessaires à l'introduction d'un produit sur le marché (qualifiers) et les arguments différenciant (winners) ; le premier étant indispensable. La stratégie de production doit intégrer ces deux concepts en prenant en compte les

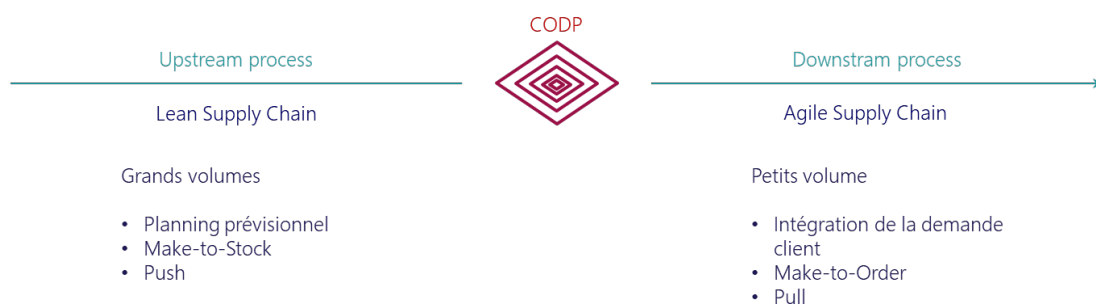
facteurs essentiels suivant : procédés, capacités, intégration verticale, qualité, organisation, planning de production et de contrôle et performance des contrôles.

La notion de point de découplage s'inscrit dans cette stratégie car il marque la frontière entre production massive type Lean incarnant ce qui est nécessaire au bon fonctionnement de l'entreprise, et production au détail Agile, élément désormais utile pour se différencier de la concurrence tant par sa rapidité que par son adaptabilité. A ce titre, (Fisher 1997) marque une nette différence entre supply chain efficiente – Lean- et sensible au marché –Agile- que l'on peut retrouver sur la figure 1.

La littérature soulève régulièrement la question de l'unicité de cette barrière.

(Garcia-Dastugue et Lambert 2008) et (Daaboul et Cunha 2012) sont en désaccord concernant l'unicité du point de découplage et cet article n'a pas pour vocation de trancher sur son unicité ou non. Nous mettons cependant en évidence la nécessité pour de futurs auteurs de parvenir à un consensus sur ce sujet. En effet, pour déterminer sa position optimale, il conviendra de savoir si cet optimal est local ou global. Nous supposons cependant dans notre étude que ce point est unique, ainsi nous serons en mesure d'aboutir à un premier résultat.

Sources : (Jeong 2011), (Olhager 2010), (van Donk 2001).



CODP : Customer Order Decoupling Point

Figure 1 Localisation conceptuelle du point de découplage

2.3 Spécificité des points de découplage et de différenciation

(Garcia-Dastugue et Lambert 2008) notent qu'une confusion générale prédomine dans la littérature : « *Les termes point de différenciation du produit et point de découplage sont traités comme des synonymes (Lee, Billington et Carter, 1993 ; Mason-Jones et Towill, 1999). Ce sont, néanmoins, deux concepts différents* ». Il convient alors naturellement de définir la notion de point de différenciation et de montrer en quoi elle est différente de la notion de point de découplage.

(Daaboul et Cunha 2012) présentent un point de différenciation comme une opération qui transforme un produit commun à tous les autres produits de la même famille en un produit, fini ou non, personnalisé. Concernant le point de découplage, ils reprennent l'explication de (JI, Qi, et GU 2007) qui le définissent comme le point de rupture entre les productions pour Stock basées sur les prévisions, et la personnalisation qui répond à la demande des clients. C'est aussi le point de rupture entre MTS et MTO, à savoir que les activités avant point de découplage sont guidées par les prévisions alors que les activités suivantes sont motivées par la demande réelle des clients. Ainsi, (Daaboul et Cunha 2012) établissent, pour une industrie donnée, le meilleur couple CODP / PDP ; le PDP étant le point de différenciation produit. Ceci atteste bien que la littérature est controversée, certains auteurs différenciant ces 2 notions ((Daaboul et Cunha 2012) et (Giard et Mendy 2007).) alors que d'autres non ((Lee 2004) et (Jeong 2011)).

Pour permettre une meilleure compréhension de ces deux notions nous présentons ici une chaîne d'assemblage de vélos et nous montrons que plusieurs cas existent : les deux points sont, ou ne sont pas confondus.

Notons que le « point où le client pénètre », (Giard et Mendy 2007), n'est pas nécessairement le point où la production va se différencier. En effet, dans le premier exemple ci-dessous (figure 2), le responsable de production a décidé de placer son stock stratégique, lieu du point de découplage, au début de la ligne d'assemblage. Cela signifie que toute la production est effectuée en flux tiré. Dès lors, c'est bien la demande d'un client qui va entraîner la réalisation de toutes les étapes à partir de la peinture du cadre même si celui-ci n'aura de choix que dans la sélection du type de cintre, lieu du point de différenciation. Dans le second cas (figure 3), les deux points sont confondus.

Cependant, même si ces points peuvent être théoriquement découplés, dans le cadre de la customisation de masse, c'est-à-dire une production très importante (Juste-à-temps) et customisable (Industrie automobile), le point de découplage sera souvent un point de différenciation, permettant de mutualiser ces deux stocks (Giard et Mendy 2007).

Les différents auteurs cités dans cette partie sont eux d'accord sur la possible multiplicité des points de différenciation.

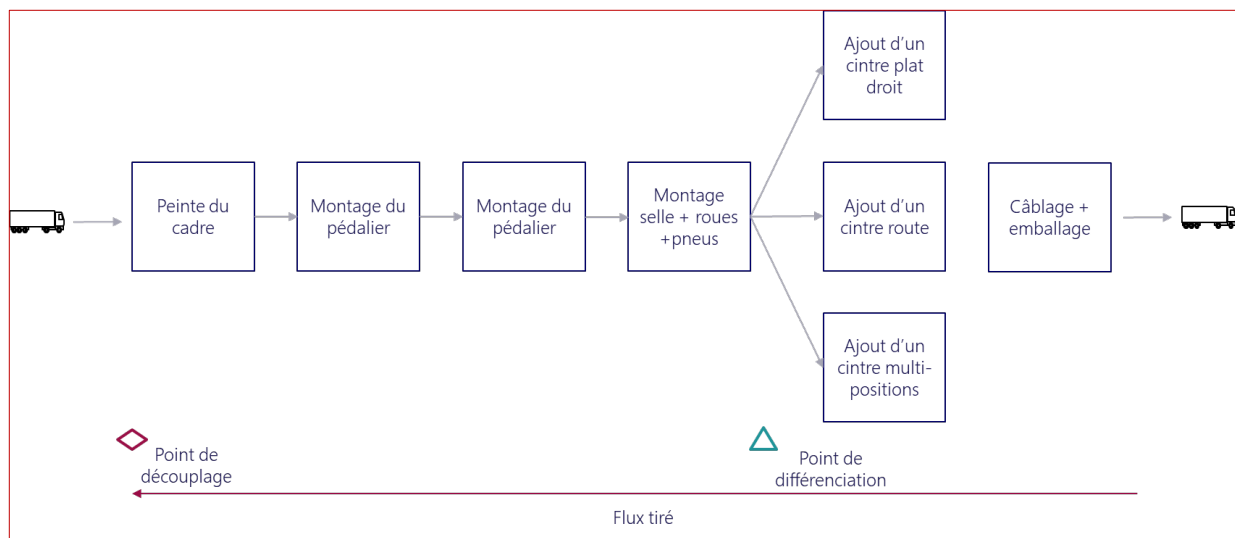


Figure 2 Chaîne de production de vélo avec point de découplage et point de différenciation disjoints

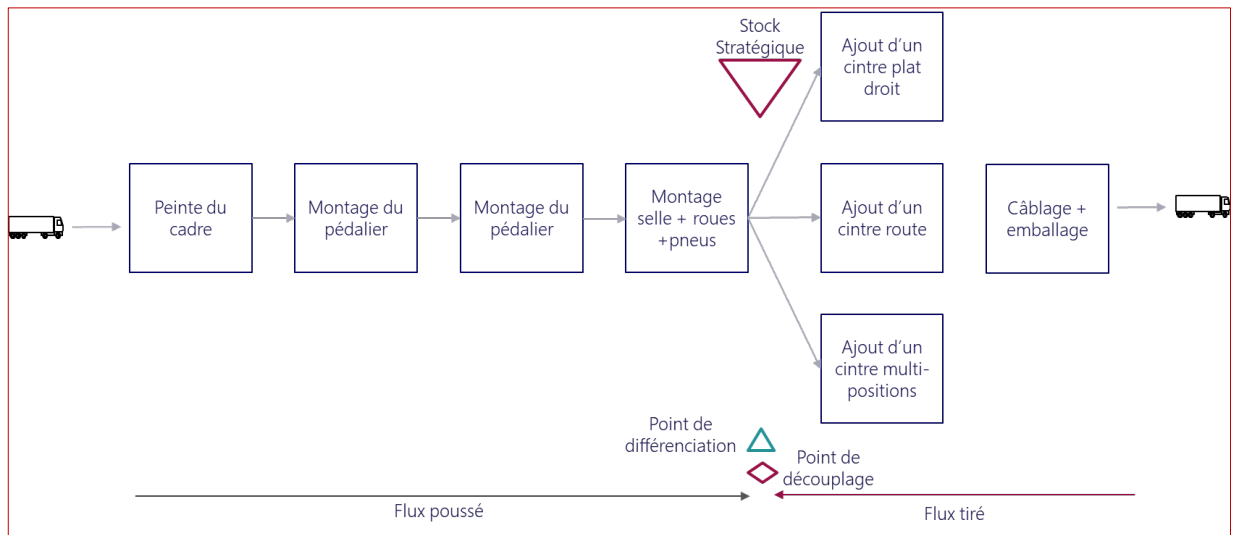


Figure 3 Chaîne de production de vélo avec point de découplage et point de différenciation confondus

3 Construction du modèle et méthodologie

3.1 Etat de l'art

Peu de modèles issus de la littérature permettent de localiser de manière pratique le point de découplage, et éventuellement un point de différenciation comme le confirment (Daaboul et Cunha 2012). Nous les présentons par la suite.

Différentes approches ont été choisies allant de la modélisation purement mathématique à la simulation pure :

3.1.1 Général

(van Donk 2001) déclare que « la littérature actuelle ne permet pas de dégager une règle permettant la localisation du point de découplage ». Dans le cadre de la production agroalimentaire de masse, donc de denrées périssables en grande quantité et diversité. Il décrit pourquoi s'intéresser au sujet du point de découplage qui est, à son sens, la zone représentant l'interaction entre la Supply Chain de l'organisation et les demandes clients. Encore une fois, ce point de découplage est perçu comme l'incarnation de la synergie entre le producteur et le client. Il correspond à la :

- Séparation d'une activité rythmée par un planning et d'une autre dictée par la demande client ce qui est important pour contrôler la façon dont les flux sont gérés
- Matérialisation du point de stockage à partir duquel les livraisons clients sont effectuées
- Variable d'optimisation de la partie amont en appliquant un modèle de planning

(de Treville, Shapiro, et Hameri 2004) présentent le concept de chaîne de demande en opposition à la chaîne d'approvisionnement classique. En introduisant ce concept, les auteurs soulignent la nécessité pour les supply chains d'adopter une vision dépassant le simple approvisionnement en ressources. Ils postulent que l'intégration de la demande n'est pas une condition nécessaire à la pérennité d'une entreprise ; une faible variabilité, une production stable et des délais de livraison corrects suffisent. Ils concluent en présentant la nécessité d'arbitrer les choix entre intégration de la demande et réduction des délais.

Depuis plus d'une cinquantaine d'années, selon (Garcia-Dastugue et Lambert 2008), le concept de différenciation retardée est apparu, et ce bien avant l'apparition des supply chains mondialisées et des premiers ERP et MRP. Cette différenciation retardée, MTS intelligent, était, à notre sens, l'alternative aux pratiques du passé qui ne pouvaient pas intégrer la demande. En effet, dans un contexte où prendre en compte la demande client en dehors des prévisions est impossible, il est nécessaire d'être réactif tout en produisant avec variété. Cependant, depuis le début du XXIème siècle, (Christopher 1999) précise que : « Les professionnels de la "Supply Chain" à l'horizon du nouveau siècle devront intégrer un certain nombre de paramètres, incluant [...] une demande croissante en produits sur mesure, ou "mass customized" et une demande des clients pour des solutions complètes, associant produits et services ». On remarque alors que des disciplines telles que les sciences des données ou bien l'optimisation trouvent naturellement place au sein du SCM.

(Giard et Mendy 2007) présentent les notions de production et d'approvisionnement synchrones qui permettent une synchronisation de la production, en temps réel ou avec un léger délai, entre le fournisseur et le client.

Ainsi, dans ce nouveau paradigme regroupant produits complexifiés, supply chains mondialisées, demande où l'attente est écourtée et la customisation plus attendue, les supply chains doivent être capable de s'adapter tout en gardant des coûts acceptables. C'est d'ailleurs pour répondre à ce besoin que nous avons choisi d'étudier cette problématique.

Pour ceci, nous pouvons en premier lieu nous baser sur une étude de 2003, (Olhager 2003), reprise par la quasi-totalité de la littérature contemporaine sur ce sujet. L'auteur présente, conceptuellement, 3 types de paramètres influençant le lieu de point de découplage :

- Le marché : délais de livraison, volatilité de la demande du produit, volume de produit, exigences relatives à la gamme et à la personnalisation du produit, taille et fréquences des commandes
- La conception du produit : design produit modulable, possibilités de personnalisation, profil du matériel, complexité du produit
- Les modalités d'industrialisation : délais de production, nombre d'étapes de production, flexibilité des moyens de production, position du goulot d'étranglement, produit avec dépendances séquentielles

La figure 4 présente l'interaction de leurs paramètres.

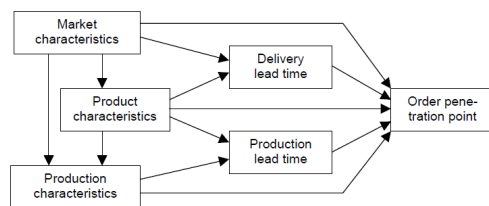


Fig. 2. Conceptual impact model for factors affecting the positioning of the OPP.

Figure 4 Interaction des paramètres - Olhager, 2003

L'auteur met en évidence le lien entre délais de livraison et de production pour localiser le point de découplage. C'est d'ailleurs sur ces critères que notre modèle est basé. L'auteur cartographie le type de production à mettre en place – MTO, MTS, ATO, etc. – en fonction de la valeur du ratio entre les deux facteurs énoncés précédemment.

De plus, il a mis en évidence ce qu'engendre un déplacement du point de découplage (tableau 1). Ses résultats sont en accord avec ceux de (Giard et Mendy 2007).

	+	-
Déplacement aval	Réduire les délais de livraison pour le client Améliorer l'efficacité de la production en optimisant la position du goulot d'étranglement	Dépendance envers le planning avec une hausse du risque d'obsolescence Moins de personnalisation Augmentation des stocks de WIP
Déplacement amont	Niveau de personnalisation des produits accru Moins de dépendance envers le planning Moins (voir pas) de stock WIP Réduction du risque d'obsolescence de l'inventaire	Augmentation des temps de livraison si les temps de production ne sont pas réduits Réduction de l'efficacité de la production

Tableau 1 Conséquence du déplacement du point de découplage dans la chaîne de production

3.1.2 Modèles

Dans la littérature, la question de la position du point de découplage et celle de son optimisation a dernièrement été posée. Notons ici que les modèles présentés sont très conceptuels. En effet, bien que mathématiquement corrects ils semblent difficiles à reprendre pour les appliquer industriellement – voir (JI, Qi, et GU 2007) par exemple.

Cependant, (Graves et Willems 2000) présentent un modèle intéressant d'optimisation des stocks pouvant permettre par la suite d'enrichir notre modèle avec un système de production non linéaire.

D'autre part, (Jeong 2011), propose un modèle analytique permettant, à l'aide du principe de Pontryagin, d'établir le lieu théorique du point de découplage. Son analyse, peu opérationnelle permet cependant de dégager de nombreuses conclusions et cette approche analytique permet d'incorporer un nombre important de paramètres tels que des coûts de déviation du taux de production ou encore de déviation du niveau d'inventaire. Ainsi, il apporte les résultats suivants :

- Le point de découplage existe si et seulement si le coût d'une déviation d'inventaire n'est pas nul
- Le positionnement d'un point de découplage de manière optimale, sous une condition de production constante,

nécessite de surestimer le taux de demande avant celui-ci.

Dans une approche tout à fait similaire à celle de (Jeong 2011), (Yang et Wang 2014) reprennent la même étude et y ajoutent la notion de détérioration des produits au cours de la chaîne de production. Ils arrivent ainsi à définir l'inventaire optimal et à localiser au sein de la chaîne de production la meilleure localisation du point de découplage en précisant que celui-ci est unique.

Ces deux dernières études, bien que très théoriques, nous sont utiles dans la définition des hypothèses de notre modèle et des paramètres à considérer, ou à laisser de côté pour tenter de rendre notre analyse plus fonctionnelle que celles présentées.

3.1.3 Simulation

On remarque alors que différents mouvements existent dans la recherche opérationnelle autour du point de découplage. Ainsi, certains ont pu établir des modèles purement théoriques avec des études de cas peu développées, quand d'autres ont pu s'attarder sur des cas particuliers sans détailler les modèles utilisés. (Daaboul et Cunha 2012) ont développé un modèle d'aide à la décision dédié et cherchent, dans le cadre de l'industrie de la chaussure, à optimiser la valeur pour le client et pour l'industriel du couple point de découplage / point de différenciation (PDD). Ils définissent la valeur comme la quantité de satisfaction créée en répondant à un besoin physique, biologique ou psychologique des parties bénéficiaires. De nombreux critères peuvent l'influencer tels que les coûts, les délais, la qualité perçue ou même le prix perçu. Ainsi les auteurs établissent que différents couples PDD/CODP engendrent différentes valeurs pour l'entreprise et différentes valeurs perçues pour le client. Cette modélisation très opérationnelle ne peut cependant être reprise facilement dans notre étude. Ajoutons que, comme le présentent (Giard et Mendy 2007), ces points sont aussi lieux de stockage. En effet, le point de découplage est présenté comme un stock stratégique.

Nous synthétisons dans le tableau 2 les différents modèles, hypothèses et conclusions de la littérature scientifique concernant notre sujet.

Dans notre étude nous avons choisi de nous inspirer des différents modèles pour créer le nôtre. La méthodologie utilisée est décrite dans la suite.

TYPE	(Jeong 2011)	(JI, Qi, et GU 2007)	(Yang et Wang 2014)
Hypothèse 1	Considère PDP, la politique d'inventaire et les décisions opérationnelles	La qualité des produits finis est indépendante de la position du point de découplage	Les objets peuvent être détériorés et on ne pourra pas les réparer
Hypothèse 2	Une méthode indirecte est utilisée, on considère la minimisation du coût d'inventaire pour maintenir le niveau d'inventaire cible.	Les délais de livraison et le coût d'inventaire en WIP à chaque étape sont indépendants de la position du point de découplage	Le taux de production est supérieur au taux de demande à cause de la détérioration
Hypothèse 3	Demande client constante.	Le WIP à l'étape j est indépendant de la position du point de découplage	La durée du cycle de vie du produit (c'est-à-dire l'horizon de décision) est finie.
Hypothèse 4	Point de découplage est une variable continue.	Premier arrivé, premier servi et même délais de livraison pour chaque client	Environnement concurrentiel
Hypothèse 5	Principe de Pontryagin	Aucun coût monétaire ou temporel d'installation	La croissance, la maturité et le déclin éventuel sont envisagées
Hypothèse 6		Aucun inventaire de produit fini	Aucune pénurie n'est autorisée, de sorte que le taux de production avant le point découplage est le taux de production cible au point de découplage
Hypothèse 7		Inventaire WIP au niveau du CODP et pas avant	Tous les taux d'objectif doivent satisfaire l'équation d'état.
Hypothèse 8		<i>Non dit, mais, point de découplage et de différenciation confondues</i>	
Paramètre 1	Point de découplage	Types de produits finis	Point de découplage dans la chaîne d'approvisionnement
Paramètre 2	Taux de demande estimé pré-PD	Le taux d'arrivée	Taux de demande estimé (c.-à-d. Taux de production) pendant le point de pré-découplage
Paramètre 3	Taux de production post-PD	Le taux de demande de tous les produits	Taux de production à t au point de post-découplage
Paramètre 4	Temps d'un cycle de production	L'ensemble des étapes de production	Taux de production cible à t au point de post-découplage
Paramètre 5	Demande client cumulée à t	CODP alternatif	Durée du cycle de vie du produit, représente également l'horizon de planification
Paramètre 6	Taux de demande à t	Le taux de service par étape	Taux de demande à t
Paramètre 7	Taux de production cible post-PD	Temps de production unitaire par étape exponentiellement distribué	Le niveau d'inventaire à t au point de post-découplage
Paramètre 8	Niveau d'inventaire post-PD	Moyenne T_j	Le niveau d'inventaire cible au moment t pendant le point de post-découplage
Paramètre 9	Niveau d'inventaire cible post-PD	Taux d'utilisation capacitaire	Le taux de détérioration se produit à l'instant t
Paramètre 10	Coût unitaire de déviation du taux de production	Taux d'utilisation capacitaire à l'étape j	Coût constant par unité d'écart par rapport au taux de production cible

Paramètre 11	Coût unitaire de déviation du niveau d'inventaire	Niveau stocks de base	Coût constant par unité d'écart par rapport au niveau d'inventaire cible
Paramètre 12		Coût d'implémentation de la customisation de masse avec le CODP à l'étape k	
		Coût d'inventaire en WIP avec le CODP à k	
		Inventaire moyen en WIP	
Paramètre 13		Le coût de ré-fabrication du produit / processus	
Paramètre 14		Le délai de remise de la livraison lorsque le niveau de stock de base est b	
Conclusion 1	PD existe ssi le coût d'une déviation d'inventaire n'est pas nul.	Avec la baisse de la production MTS, le niveau de stock au niveau du CODP a tendance à augmenter	Expression de l'inventaire optimal
Conclusion 2	Si on suppose que le cycle de vie du produit est infini (T_0) on obtient un PD plus simple	L'utilisation des stocks, en amont du CODP, lors de la production MTS, n'affecte pas la quantité de stock au niveau du CODP	Une fonction donnant le point de découplage existe et la position de ce dernier est unique
Conclusion 3	Si l'on suppose que le taux de production est constant on obtient un résultat ssi $P_0 > D$.	Plus le CODP est proche de l'équipement avec le taux d'utilisation maximum, plus la hausse du coût total sera grande.	
Conclusion 4	Si l'on applique le modèle du 0 inventaire, T^* existe ssi $P_0 < D$ ce qui veut dire que le taux de demande avant le point de découplage est sous-estimé. Dans ce cas, le niveau d'inventaire après le PD augmente de manière convexe. T^* existe quand le taux de demande avant le PD est sous-estimé.	Le taux d'utilisation des équipements après le CODP ne peut pas être très élevé	
Conclusion 5	Pour T_0 infini et un inventaire nul, on peut quantifier les progrès		

Tableau 2 Extrait de la littérature en matière de modélisation

3.2 Présentation du modèle

Dans la suite de cet article nous présentons un modèle de simulation d'une chaîne de production simple en reprenant de manière dynamique, les bases de la modélisation d'une telle chaîne. Nous nous basons sur les hypothèses et directions présentées précédemment pour optimiser, par simulation, la localisation du point de découplage au sein d'une chaîne de production en utilisant le logiciel Open Source R. Plus exactement, nous cherchons à le positionner pour avoir un taux de service maximal tout en ayant une valeur de stocks totale minimale. En effet, la valeur ajoutée apportée par chaque étape de production permet, dans une première approximation, de valoriser les stocks. De plus, les commandes passées par les clients seront soumises à un délais maximal de production qui permettra de mettre en évidence la notion de taux de service.

Ainsi, l'enjeu sera de diminuer le coût de possession des stocks tout en assurant un taux de service acceptable.

Ayant à notre disposition les différentes contraintes et une valorisation de stocks nous aurions pu choisir d'utiliser un algorithme d'optimisation linéaire, de type simplexe, pour résoudre ce problème. Cependant, la position du point de découplage étant une valeur discrète notre problème, il nous a paru plus aisé et visuel de simuler notre problème un grand nombre de fois. En effet, s'agissant d'un problème avec une complexité faible, il est simple d'opérer de multiples simulations de demande et de production sous R. De plus, la mise en place d'un tel algorithme pourra s'avérer nécessaire dans de prochaines recherches, cependant, ici, le modèle se veut construit pragmatiquement et nous souhaitons comparer différents cas de figures, ce qui est impossible à faire avec un algorithme tel que celui du simplexe.

3.3 Méthodologie

Nous avons en première partie mis en évidence l'intérêt du point de découplage, permettant, par le design de la SC d'assurer un compromis entre temps et coûts de production dans le cadre de la customisation de masse. C'est sur cet arbitrage, temps / coût, que notre modèle va se cristalliser.

Dès lors, il est important de notifier, qu'à l'instar de (Giard et Mendy 2007), nous nous plaçons dans le cadre de la customisation de masse, ce qui peut correspondre par exemple à une usine de production d'un équipementier automobile. En effet, l'enjeu actuel de l'industrie de masse est de produire de l'unitaire au coût de la production de masse. On a ainsi pu voir ces dernières années des marques automobiles démultiplier le choix d'options – toits colorés, jantes nuancées, équipements connectés au choix, etc. On comprend bien l'intérêt commercial d'une telle approche, et on voit clairement apparaître des contraintes liées à la production. On confondra les deux points dissociés précédemment. Une hypothèse implicite est que l'on peut, par simulation, déterminer le point de découplage optimal, et ce, sans réellement considérer les décisions opérationnelles et politiques au sein de l'entreprise.

Notre modèle se présente comme suit : La complexité apportée par la multiplication du nombre de machines identiques pour équilibrer, temporellement, la chaîne n'apporte rien à notre modèle. On rassemble alors les machines multiples en une machine tout aussi rapide. La chaîne de production considérée est alors linéaire et équilibrée.

Ceci implique qu'à chaque t , les machines produisent en utilisant tout ou partie du stock amont.

Nous supposons aussi que, la production pré-point de découplage est en flux poussé, il n'y pas de stocks avant ce point. Cette production se base sur une prédiction de production constante tout au long de la vie de l'usine. On retrouve en figure 5 la schématisation de l'usine. Nous décrivons dans la suite les différentes hypothèses utilisées.

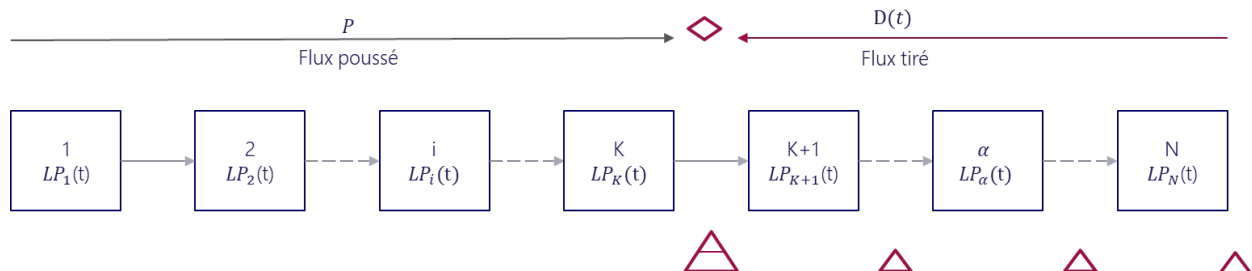


Figure 5 Modèle retenu

3.3.1 Hypothèses

Voici les différentes hypothèses nécessaires à notre modèle :

- H1 : La production ne cesse jamais et la qualité des produits est toujours acceptable. Aucun refus de produit n'est possible.
- H2 : La chaîne de production est linéaire et équilibrée. Cela signifie qu'il y a une machine par étape de production et chaque étape possède le même temps d'exécution. Cette hypothèse forte pourra être discutée par la suite. Elle est cependant nécessaire à l'établissement d'un premier modèle permettant de mettre en évidence des tendances comportementales.
- H3 : La production pré-point de découplage est constante. Celle-ci est basée sur les prévisions de vente et est donc faite en flux poussé.
- H4 : La demande est exprimée sous la forme d'une fonction discrète : $D : t \rightarrow D(t)$. Cette demande remonte la chaîne de production jusqu'au point de découplage. On peut faire l'analogie avec un système de Kanban où le Kanban de commande remonte à l'étape amont à chaque t .
- H5 : Les stocks sont nuls avant le point de découplage. En effet, H4 indique que la production en amont du point de découplage est optimisée et ainsi, la quantité de stocks tend vers 0. De plus, (JI, Qi, et GU 2007) affirme que l'utilisation de stocks, ou non, en amont du point de découplage, lors de la production MTS, n'affecte pas la quantité de stock au niveau du COPD et en aval de celui-ci.
- H6 : Premier arrivé, premier servi et même délais de livraison pour chaque client. On applique le principe du FIFO. De plus, si le client n'est pas servi instantanément, sa commande est considérée comme non livrable. Ceci engendre donc une diminution du taux de service.
- H7 : Aucun coût monétaire ou temporel d'installation. En effet, dans un modèle plus fin on pourrait considérer que placer le point de découplage, et donc des stocks, à un endroit plutôt qu'un autre, pourrait engendrer des coûts supplémentaires et différents.
- H8 : Les temps de transfert sont négligés. On considère que les lignes de production sont collées aux stocks et que donc les transferts sont instantanés. Le shop stock de

sorti de la machine i correspond au shop stock d'entrée de la machine $i+1$.

- H9 : Nous ne produisons ici qu'un seul type de produit.

Ces différentes hypothèses permettent de construire un modèle cohérent, réaliste et flexible. Par exemple, si l'usine considérée est une usine de fabrication de capotes de voitures, on pourrait aisément modifier la loi de demande et l'indexer sur les données météorologiques. Il en est de même pour la valorisation des stocks et d'autres types de paramètres.

H2 est une hypothèse nécessaire pour permettre d'aboutir à ce stade de nos recherches, on pourra cependant, par la suite, considérer une organisation en araignée, bien plus complexe.

3.3.2 Paramètres

Pour pouvoir mettre en place notre modèle il est nécessaire de définir les différents paramètres et variables utilisés. De plus, on retrouve le code R et donc la définition rigoureuse de ces objets en annexe.

- N Nombre d'étapes de production
- $k \in \llbracket 1; N \rrbracket$ Lieu du point de découplage, le stock K est donc le stock stratégique.
- $j \in \llbracket 1; T \rrbracket$ La référence du lot commandé où T correspond au dernier.
- P Demande estimée pré-point de découplage
- $LP_i, i \in \llbracket 1; N \rrbracket$ Le taux de production de l'étape i à l'étape de production j . Nous la modélisons par une loi de poisson de moyenne P , supposant ainsi que la production est indépendante de la production précédente mais que toutes les machines sont identiques. Cette hypothèse ajoute de la complexité au modèle et permettra surtout, dans des recherches à venir, de considérer facilement le comportement réel des machines.
- $D: t \rightarrow D(t)$ La demande client qui est exprimée ici par une loi normale centrée en P et d'écart type égal à 20% de P . Cette loi modélise ainsi une demande quasi-constante mais pouvant, à l'instar d'une usine de production d'équipements automobiles, subir de légères modifications car totalement dépendantes des ventes des clients, constructeur automobile.
- $S_i: t \rightarrow S_i(t), i \in \llbracket K; N \rrbracket$ Le stock en i à t . On peut l'exprimer comme suit :

$$S_i(T_0) = S_i(T_0 - 1) + LP_i(T_0) * D(T_0 + i - N - 1) - LP_{i+1}(T_0) *$$

$D(T_0 + i - N)$. Ainsi le stock i à T_0 est celui à $T_0 - 1$ en y ajoutant ce qui a été produit à l'étape i et en soustrayant la production de l'étape $i + 1$. Pour la dernière étape on soustrait alors, si cela est possible, la commande que l'on expédie,

- $V_i(T_0) = S_i(T_0) * v(i)$

Représente la valeur du stock i à T_0 . On suppose d'ailleurs que la valeur unitaire du stock i est proportionnelle à l'étape i . Autrement dit, les stocks sont d'autant plus chers que la valeur ajoutée dans les étapes précédentes est importante. Encore une fois, cette valorisation est arbitraire. Elle est cependant suffisante pour exprimer des indicateurs révélateurs de tendances indépendantes de la fonction de valorisation utilisée tant que celle-ci est croissante.

Comme présenté précédemment le stock i se trouve après l'étape de production i .

Le stock au niveau du point de découplage ne s'exprime pas de la même manière que les stocks suivants ; une partie flux poussé et une partie flux tiré. Le stock final a lui aussi une expression différente.

3.3.3 Contraintes

Pour parfaire notre modèle il convient d'y apporter différentes contraintes, intrinsèquement liées à une usine de production. Ainsi, les machines ne peuvent pas assouvir une demande infinie. Autrement dit, les machines fonctionnent toutes à capacité finie C . C est proportionnelle à P . En effet, on considère que l'usine a été dimensionnée grâce aux prévisions de production, comme il est d'usage chez les équipementiers automobiles par exemple. En effet, on désire généralement un rendement maximal des machines tout en minimisant les stocks et donc vendre le plus rapidement possible ce que l'on produit.

La seconde contrainte est un choix nécessaire et laisse place à deux possibilités. En effet, une machine produira le minimum entre la demande qu'elle reçoit et les stocks amont disponibles. Ainsi, si ce minimum correspond au stock amont, il demeurera une demande résiduelle qui sera donc reportée au tour suivant.

En termes de livraison des commandes, deux possibilités existent :

1. Si une commande ne peut être honorée dans son intégralité elle est alors annulée, le taux de service en pâti mais cela permet de reformer les stocks.
2. Si une commande ne peut être honorée dans son intégralité on livre alors ce que l'on peut, le taux de service en pâti aussi, les stocks restent tendus.

Nous choisissons dans notre étude de cas l'option 1.

4 Etude de cas

4.1 Résultats généraux

Le modèle ¹ établi précédemment nécessite de nombreux arbitrages pour les différents paramètres. Dans notre démarche de recherche nous choisissons de nous inspirer des paramètres d'une usine réelle.

On suppose que la demande client est exprimée T fois, avec $T = 1000$ pour s'écarter du lancement de production.

La production de prévision par tranche T, P , est constante entre 0 et T et P est de 1000 pièces par cycle. Ceci correspond aux ventes moyennes journalières de l'usine considérée.

La capacité maximale des machines est de

$$C = 1.2 * P = 1200 \text{ pièces par cycle.}$$

Dans un premier temps nous nous éloignons de notre usine et observons le comportement de nos indicateurs pour des valeurs de n comprises entre 5 et 15 puis pour $n=50$. Ainsi pour chaque valeur de n nous faisons varier k entre 2 et $n-1$.

Notons que pour chaque position de k , on procédera à $it = 50$ itérations pour s'affranchir du hasard lié aux différentes lois utilisées.

Comme proposé précédemment, il convient de trouver des indicateurs simples et pertinents pour juger de l'intérêt de notre modèle. Ainsi nous utiliserons les indicateurs suivants :

- La valorisation totale des stocks
- Le taux de service

Le détail des résultats est en accès libre. De plus, les différentes représentations pour tous les n sont en annexe. Nous en présentons ici une synthèse.

¹ Voir le code en annexe

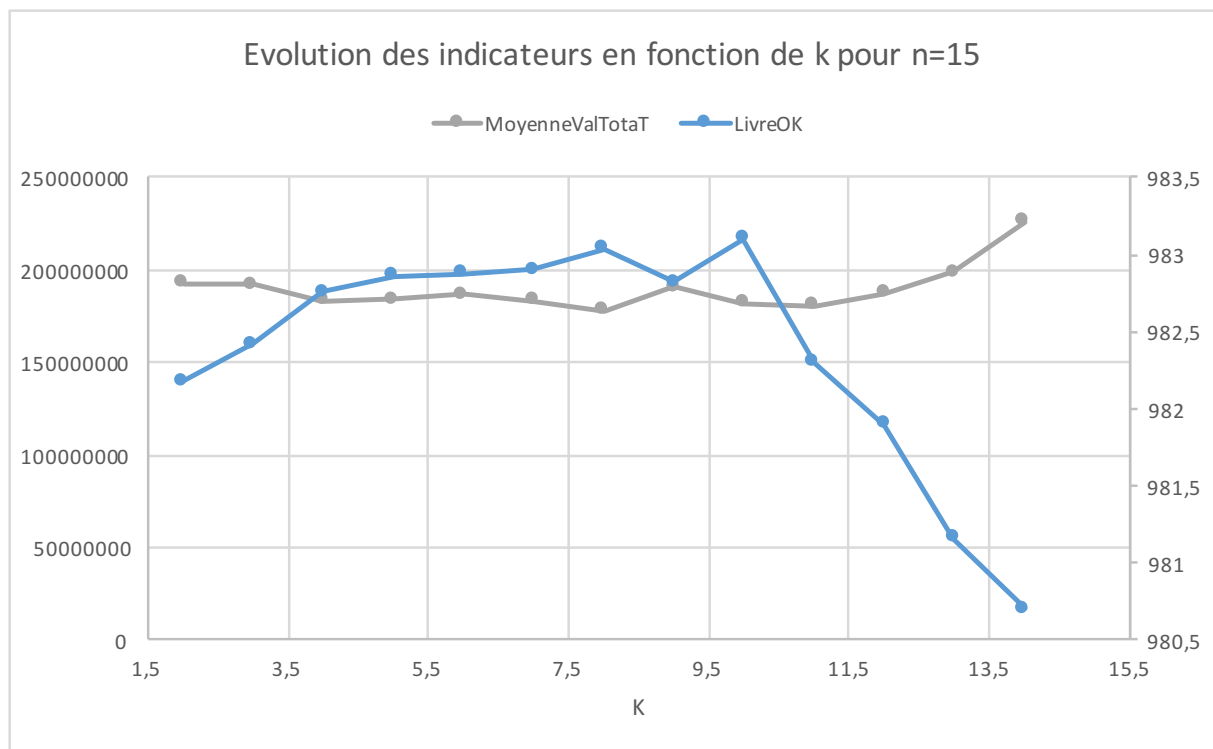


Figure 6 Valeur des stocks et taux de service en fonction de la position du point de découplage pour n=15

On retrouve en bleu le taux de service, pour k=8 on a un taux de service de 98,3%. En gris on retrouve la valorisation totale des stocks.

On remarque tout d'abord que peu importe n, la valeur des stocks a toujours tendance à augmenter avec k.

Résultat 1 : La valeur globale des stocks augmente lorsque le point de découplage se déplace vers l'aval.

Dans notre cas, les stocks à l'étape i sont valorisés unitairement selon la loi $v: i \rightarrow v(i) = 2^i$ ce qui est volontairement exagéré. Alors, la valorisation possède une faible pente pour i proche de 1 et donc la position du point de découplage n'affecte pas la valeur des stocks pour k proche de 2. Autrement dit, en amont de la chaîne de production un déplacement du point de découplage n'affecte que peu la valeur totale des stocks. Au contraire, en aval de la chaîne de production, une modification de la localisation du point de découplage impacte grandement la valeur totale des stocks.

Résultat 2 : Plus le point de découplage est placé en aval de la supply chain, moins le taux de service est élevé.

Ce résultat peut se comprendre sur la figure 7. En effet, le point de découplage correspond à un stock plus variable que les stocks aval. De plus, ces derniers agissent comme des tampons entre le point de découplage et la fin de la chaîne de production.

Ainsi, plus le point de découplage est en aval de la chaîne, plus sa variabilité affecte le taux de service.

Ainsi, il semble plus efficace de placer le point de découplage le plus en amont possible dans la Supply Chain. Néanmoins, une analyse des pentes nous permet d'établir la conjecture suivante pour le modèle de valorisation choisi.

Conjecture 1 : si le point de découplage se trouve à plus de 70% de la chaîne de production (par exemple, k=7 pour n=10) le taux de service de service décroît fortement.

Pour obtenir ce résultat nous avons trouvé, pour chaque usine (n) la modification du lieu du point de découplage qui engendre la plus grande baisse du taux de service.

Ce phénomène confirme le résultat 2. De plus, il met en évidence l'importance du rôle de la localisation du point de découplage. En effet, un mauvais choix dans sa localisation peut engendrer, pour la même usine, un taux de service dégradé et donc de moins bons résultats.

4.2 L'usine X

Cette usine a été choisie, car bien que la production ne soit pas totalement linéaire, on peut grossièrement le supposer. On considère alors qu'il y a 10 étapes de production, toutes étant susceptibles d'être le lieu du point de découplage.

Nous visualisons ici la distribution des stocks après l'étape T.

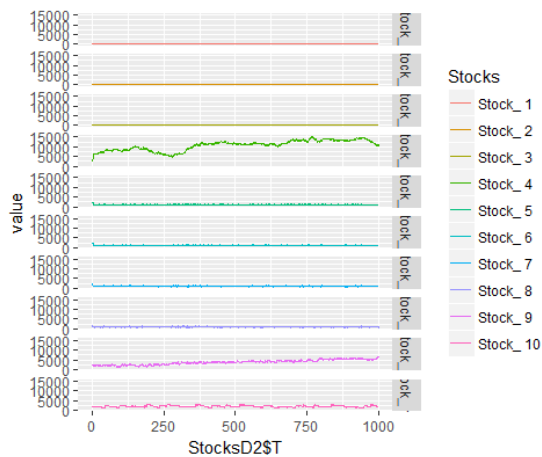


Figure 7 Quantité de stocks pour $n=10$ et $k=4$

Le stock au niveau de point de découplage adopte plusieurs comportements. Dans les premiers t , il augmente naturellement car la production en flux poussée existe mais la demande n'a pas eu le temps de remonter.

Par la suite, la demande en production est censée équilibrer la production amont. Cependant, les commandes non honorées par manque de stock engendrent, paradoxalement, un stock résiduel. Alors, le stock au point de découplage a tendance à augmenter légèrement. Le stock 9, précédant la dernière étape de production, suit le même comportement pour les mêmes raisons. Les autres stocks ont quant à eux tendance à s'équilibrer.

On constate aussi qu'il s'agit, de loin, du plus gros stock présent dans l'usine, ce qui justifie, pour des raisons de coûts et d'espace, de se pencher sur sa localisation.

Résultat 3 : Le stock au niveau du point de découplage est le stock le plus important de l'usine.

Ainsi, la figure 8 présente l'état des stocks en fonction de la localisation du point de découplage. La courbe bleu représente la valeur totale des stocks détenues dans l'usine.

On constate alors que les stocks sont, en termes de quantité, plus importants lorsque le point de découplage est placé haut dans la supply chain. Cependant, on retrouve le résultat 1.

On soulève ici la question du volume des stocks, paramètre que nous n'avons pas pris en compte. En effet, cette contrainte d'espace pourrait limiter les choix possibles dans la position du point de découplage.

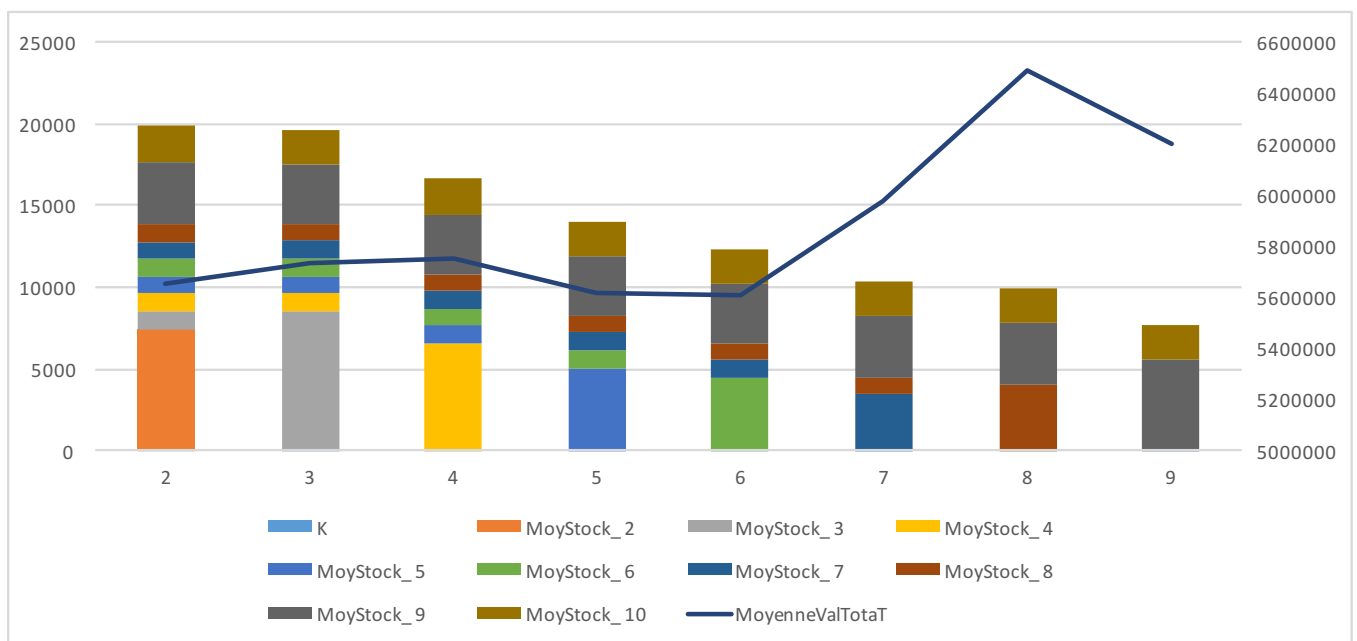


Figure 8 Valorisation et quantité de stocks en fonction de k

4.3 Modification du mode de valorisation

Dans cette partie, nous gardons les mêmes paramètres mais modifions la loi de valorisation des stocks. Ainsi, à l'étape i , une unité de stock coûte $i+1$. En appliquant ce modèle de valorisation avec une pente bien plus faible que précédemment, la valeur des stocks est constante jusqu'à $k=6$ puis décroît légèrement.

Ce résultat contredit le résultat 1. Ainsi, on montre que l'utilisation de modèles doit être adaptée à l'usine considérée et que le résultat 1 n'est pas toujours pertinent.

Comme on pouvait s'y attendre, cette modification n'influe pas le taux de service. Alors le résultat 2 est confirmé.

5 Discussion

En établissant un modèle par simulation, il était possible d'obtenir des résultats inattendus. En effet, alors que la littérature, (Giard et Mendy 2007) ou encore (Olhager 2010), prédit qu'un déplacement aval du point de découplage améliore le taux de service, notre modèle permet de conclure le résultat inverse.

Ce résultat surprenant, et pourtant justifié dans la partie précédente, est propre au modèle mis en place. Cette contradiction souligne ce que nous mettions en évidence plus haut : la notion de taux de service utilisée n'est pas la plus fiable. De plus, il serait pertinent d'ajouter, comme le présentent (JI, Qi, et GU 2007), la notion de taux d'utilisation des équipements. Ceci est envisageable en utilisant notre modèle. On pourra alors confirmer, comme il est pressenti, qu'éloigner le point de découplage de la machine la plus utilisée permettra de baisser les coûts totaux.

Dès lors, il sera intéressant dans de futures études d'affiner la définition des indicateurs.

Notons que de nombreuses autres analyses sont possibles, on peut aisément, à l'aide de différents moments statistiques, étudier l'évolution des stocks dans le temps. Cependant, à ce stade de notre étude, l'intérêt d'une telle analyse n'est pas avéré. On retrouve néanmoins le code R permettant ces analyses en annexe.

Dans le modèle proposé il semble qu'il existe une zone où le point de découplage permet d'optimiser les deux paramètres considérés. En effet, on montre que ce n'est pas nécessairement en remontant un maximum le point de découplage que le couple Taux

de service / Valeur des stocks a le plus de valeur, au sens de (Daaboul et Cunha 2012). Ce résultat est d'ailleurs confirmé et affiné, avec la notion de point de différenciation, par (Daaboul et Cunha 2012).

Même si ce lieu reste approximatif et pourvu de nombreuses hypothèses, notre travail met en évidence, de manière pratique, le grand intérêt que possède cette notion. En effet, on peut facilement envisager qu'en allant plus loin dans la modélisation, on puisse permettre à des entreprises de remettre en question leur Supply Chain interne et ainsi de la rendre plus rentable mais aussi de trouver la juste limite entre Lean et Agile.

Il convient de se poser la question de la pertinence des paramètres.

Ces derniers sont cohérents dans le sens où ils sont issus d'études précédentes et confirmés par ce qui existe réellement sur le terrain. Cependant, ils ne sont pas exhaustifs et notre modèle n'est que révélateur de tendances et non une photographie du réel.

Nous pouvons présenter ici de nombreux points d'améliorations quant aux recherches futures.

La littérature présentée précédemment nous offre à elle seule de nombreuses opportunités d'évolution. Cependant, nous devons les intégrer tout en gardant une dimension opérationnelle très importante. En effet, la complexité des produits et procédés actuels peut être un piège lors de la modélisation d'une usine.

Nous pouvons, pour poursuivre cette recherche d'objectivité, intégrer la multiplicité des produits et donc mettre en évidence l'idée de customisation évoquée précédemment. Pour coller au plus près d'une réelle chaîne de production il conviendra aussi d'intégrer de nombreux autres coûts, l'argent étant une variable décisionnelle importante dans l'industrie. Ces différents coûts peuvent être intégrés en incorporant le taux d'utilisation des machines, le report des commandes non honorées au lieu de les annuler, et donc redéfinir la notion de taux de service.

On pourra aussi complexifier la chaîne de production en s'écartant du modèle linéaire établi au début de notre étude. Cette évolution est l'une des plus impérative pour faire apparaître d'autres notions inhérentes à l'étude des supply chains telles que les goulots d'étranglements (Giard et Mendy 2007).

Cependant, dans la quête du réalisme nous pourrions atteindre une limite importante : la complexité du modèle. Dès lors, on pourrait aussi imaginer utiliser

l'analyse décisionnelle pour décider et hiérarchiser les nouveaux paramètres à intégrer à notre modèle.

De plus, et ce de manière moins quantitative, on se rend compte qu'il pourra être nécessaire de considérer les décisions opérationnelles et politiques au sein de l'entreprise. (Jeong 2011) permettait aussi de tirer la même conclusion.

Nous pouvons ajouter la notion de qualité qui sera source, elle aussi, de reports de commandes. Notons que les auteurs présentés dans le tableau 1 ne prennent pas en compte ce paramètre.

Cette optimisation ne se pourra faire qu'à condition de disposer de bases de données de production solides. En effet, l'émergence, à la fin du XXème siècle, d'outils tels que les ERP et MES a permis la collecte de nombreuses données. Ces données difficilement exploitables dans le cadre du SCM le sont désormais. La conclusion de (Waller et Fawcett 2013) affirme que les analyses prédictives et l'utilisation des données à disposition représente une réelle opportunité, pour l'instant inexploitée, dans l'optimisation des Supply Chains car le lien entre les données de production et leur exploitation est souvent difficile à faire. Nous pensons néanmoins qu'un modèle tel que le nôtre est en mesure de recevoir certaines de ces données, et ce de manière simplifiée dans les domaines suivants:

- Modèle de demande
- Loi de production
- Baisse ou hausse de capacité

Ainsi, ce modèle apportant de premières conclusions quant à l'intérêt de la localisation du point de découplage, permet d'imaginer l'intégration des 'data sciences' au SCM.

6 Conclusion

Dans cet article nous avons fait un premier modèle, simple, permettant de poser les bases et d'ouvrir des pistes pour trouver une localisation opérationnelle et précise du point de découplage par simulation d'une usine de production. Nous avons mis en évidence le rôle de la localisation du point de découplage : pour optimiser le compromis : baisse du coût de détention des stocks, amélioration du taux de service. Trois constats ont été formulés : la valeur totale des stocks augmente lorsque le point de découplage est déplacé en amont de la chaîne de production, le taux de service a tendance à chuter lorsque le point de découplage se situe trop en aval et le stock au niveau du point de découplage est le stock le plus important

de l'usine. A cet effet, le code proposé est flexible et peu aisément être amélioré.

Ainsi, même si l'objectif de produire unitairement au coût de la grande série paraît à l'heure actuelle difficile pour des raisons inhérentes au coût de détention des stocks et aux coûts engendrés par des changements de process ; l'industrie, à travers le SCM, dispose d'un vaste champ d'investigation pour réduire efficacement ses coûts et rendre sa supply chain efficiente. Le point de découplage joue un rôle tampon entre production Lean et production Agile. Sa meilleure localisation peut donc être un des leviers de compétitivité.

On pourra envisager dans de futures recherches d'incorporer la notion de point de différenciation et d'étudier l'impact respectif des deux points sur l'optimisation de la supply chain.

S'intégrant à de futures recherches dans le cadre de l'industrie du futur, il pourra aussi être intéressant d'analyser en quoi la mise en œuvre de nouvelles solutions industrielles digitalisées peut être une arme efficace dans le SCM et impacter la notion de point de découplage. La collecte massive de données et l'évolution des process, en s'intégrant à des modèles d'optimisation, pourront permettre d'entrevoir de nouvelles opportunités dans l'optimisation des procédés de production.

Bibliographie

- Christopher, Martin. 1999. « Les enjeux d'une supply chain globale ». *Logistique & Management* 7 (1): 3–6.
- . 2000. « The agile supply chain: competing in volatile markets ». *Industrial marketing management* 29 (1): 37–44.
- Christopher, Martin, Robert Lowson, et Helen Peck. 2004. « Creating agile supply chains in the fashion industry ». *International Journal of Retail & Distribution Management* 32 (8): 367–376.
- Christopher, Martin, et Helen Peck. 2004. « building the resilient supply chain ». *International Journal of Logistics Management*, Vol. 15, No. 2, pp1-13,.
- Cid Yanez, F., J.-M. Frayret, F. Léger, et A. Rousseau. 2009. « Agent-Based Simulation and Analysis of Demand-Driven Production Strategies in the Timber Industry ». *International Journal of Production Research* 47 (22): 6295–6319.
- Daaboul, Joanna, et Catherine Cunha. 2012. « Differentiation and Customer Decoupling Points: Key Value for Mass Customization »

- Disney, S.M., et D.R. Towill. 2003. « The Effect of Vendor Managed Inventory (VMI) Dynamics on the Bullwhip Effect in Supply Chains ». *International Journal of Production Economics* 85 (2): 199-215.
- Donk, Dirk Pieter van. 2001. « Make to Stock or Make to Order: The Decoupling Point in the Food Processing Industries ». *International Journal of Production Economics* 69 (3): 297-306.
- Fisher, Marshall L. 1997. « What is the right supply chain for your product? » *Harvard business review*.
- Garcia-Dastugue, Sebastian J., et Douglas M. Lambert. 2008. « Différentiation retardée interorganisationnelle dans la supply chain ». *Logistique & Management* 16 (1): 31-46.
- Giard, Vincent, et Gisèle Mendy. 2007. « De l'approvisionnement synchrone à la production synchrone dans la chaîne logistique ». *Revue française de gestion*, n° 2: 65-88.
- Graves, Stephen C., et Sean P. Willems. 2000. « Optimizing Strategic Safety Stock Placement in Supply Chains ». *Manufacturing & Service Operations Management* 2 (1): 68-83.
- Jeong, In-Jae. 2011. « A dynamic model for the optimization of decoupling point and production planning in a supply chain ». *International Journal of Production Economics* 131 (2): 561-67.
- Ji, Jian-hua, Li-li Qi, et Qiao-lun GU. 2007. « Study on CODP Position of Process Industry Implemented Mass Customization ». *Systems Engineering - Theory & Practice* 27 (12): 151-57.
- KYU, Associés, et AMRAE. 2017. *La Gestion du Risque Supply Chain dans l'entreprise*.
- Lee, Hau L. 2004. « The triple-A supply chain ». *Harvard business review* 82 (10): 102-113.
- Olhager, Jan. 2003. « Strategic Positioning of the Order Penetration Point ». *International Journal of Production Economics* 85 (3): 319-29.
- . 2010. « The role of the customer order decoupling point in production and supply chain management ». *Computers in Industry, Trends and Challenges in Production and Supply Chain Management*, 61 (9):
- Stavrulaki, Euthemia, et Mark Davis. 2010. « Aligning products with supply chain processes and strategy ». *The International Journal of Logistics Management* 21 (1): 127-151.
- Treville, Suzanne de, Roy D Shapiro, et Ari-Pekka Hameri. 2004. « From Supply Chain to Demand Chain: The Role of Lead Time Reduction in Improving Demand Chain Performance ». *Journal of Operations Management* 21 (6): 613-27.
- Waller, Matthew A., et Stanley E. Fawcett. 2013. « Data science, predictive analytics, and big data: a revolution that will transform supply chain design and management ». *Journal of Business Logistics* 34 (2): 77-84.
- Yang, Kuan, et Ermei Wang. 2014. « Optimal control of decoupling point with deteriorating items ». *Journal of Industrial Engineering and Management* 7 (5).

Annexe A : Code simplifié avec iterations possibles sur k

```
##### Parametres #####
#####
n=10 #Notre chaîne de production linéaire et équilibrée possède n tapes

T=500 #On suppose que la demande client est exprimée T fois
P=1000 #La production en flux poussé de l'usine
C=1.2*P #La capacité maximale des machines
for (k in 2:(n-1)){

it=50 #itérations ? parametres (ci-dessus) constants
Indic=data.frame() #Indicateurs nécessaires à l'analyse, sont exprimés en
fin de code.
for (i in 1:it){
  for(j in 1:4){
    Indic[i,j]=0
  }
}

#itérations de la même usine
for(m in 1:it){

  #La production flux tirée / tranche T de prod, D, entre 0 et T
  D1=1 #vestige à supprimer in-fine
  D2=rnorm(T,P,P*0.2) #La demande varie pour tout T selon une loi normale d
e moyenne P et d'écart type P*0.2

  #####Pre-decoupling point#####
  #####

  Travail=data.frame() #Entre 0 et T, les machines entre 1 et N produisent
selon une loi de Poisson de moyenne P, normalisée
  for (i in 1:n){
    for(j in 1:T){

      Travail[i,j]=rpois(1,P)/P
    }
  }
  nomrow=c(paste("LP_",1:n))
  rownames(Travail)=nomrow
  nomcol=c(paste("P/T=",1:T))
  colnames(Travail)=nomcol

  Travail[n+1,]=P

  #####Post-decoupling point#####
  #####

  Travail[n+2,]=D1
```

```

Travail[n+3,]=D2

nomrow=c(nomrow,"P","D cste","D norm")
rownames(Travail)=nomrow

Travail=as.data.frame(t.data.frame(Travail))#Pour travailler plus simplem
ent

#Les stock post-DP s'expriment comme suit
##Hypothèses :
#Les stocks en k ? T=1 sont ?gaux ? P, Les autres sont nuls.
#####POUR D2#####
StocksD2=data.frame() #On n?gllige Les stocks interm?diaires en WIP avan
t k; il n'y a donc PAS de WIP avant k
for (i in 1:n){
  for(j in 1:T){
    StocksD2[i,j]=0
  }
}
rownames(StocksD2)=c(paste("Stock_",1:n))
nomcol=c(paste("P/T=",1:T))
colnames(StocksD2)=nomcol
#Pour travailler plus simplement
StocksD2=as.data.frame(t.data.frame(StocksD2))

for (i in k:n) #On definit ici Les stocks initiaux
{
  StocksD2[1,i]=2*P
}

DemIniD2=StocksD2 #On exprime La demande
colnames(DemIniD2)=c(paste("DemIni_",1:n))
DemIniD2[,]=0

for (j in 1:T){
  for (i in (k+1):n){
    if (j-n+i>0){
      DemIniD2[j,i]=Travail[j-n+i,n+3]
    }
    else
    {DemIniD2[j,i]=0}
  }
}
}%Cette demande sera reactualisee a chaque j, entre 2 et T, avec La deman
de residuelle

#Production ? capacit? finie C
ProdDesD2=StocksD2
colnames(ProdDesD2)=c(paste("Prod_",1:n))
ProdDesD2[,]=0
ProdMaxD2=ProdDesD2

```

```
ProdD2=ProdDesD2
```

```
#Cest la vraie prod
```

```
#ProdDesD2 est la production que l'on peut realiser vu les machines et la demande
```

```
#ProdMaxD2 est la production que l'on peut realiser vu les machines et les stocks, et la capacite max des machines
```

```
#ProdD2 est la production que l'on realise
```

```
for (j in 1:T) #prod k, production au niveau du point de decouplage, on considere qu'elle depend encore des previsions et est toujours alimentee de P produits
```

```
{  
  ProdDesD2[j,k]=P*Travail[j,k]  
  ProdD2[j,k]=ProdDesD2[j,k]  
}
```

```
for (j in 2:T) #Production reelle  
{
```

```
  for (i in (k+1):n) #On definit la prod desiree a j  
  {  
    #ProdDesD2[1,n]=DemIniD2[1,n]*Travail[1,n]  
    ProdDesD2[j,i]= DemIniD2[j,i]*Travail[j,i]  
  }  
}
```

```
for (i in (k+1):n) #On definit la prod max a j  
{  
  cste=(StocksD2[j-1,i-1]*Travail[j,i])  
  ProdMaxD2[j,i]= min(cste,C)  
}
```

```
for (i in (k+1):n) #Production effective  
{  
  ProdD2[j,i]=min(ProdDesD2[j,i],ProdMaxD2[j,i])  
}
```

```
  for (i in k:n-1) #avant l'etape de livraison  
  {  
    StocksD2[j,i]<-StocksD2[j-1,i]-ProdD2[j,i+1]+ProdD2[j,i]  
    DemIniD2[j+1,i]<-DemIniD2[j+1,i]+DemIniD2[j,i]-ProdD2[j,i]  
  }
```

```
if (j==2) #Taux de service
```



```

{LivreOK=T}

StocksD2[j,n]<-StocksD2[j-1,n]-DemIniD2[j,n]+ProdD2[j,n] #Expression d
es stocks SI l'on peut livrer la commande integralement

if (DemIniD2[j,n]<=StocksD2[j,n]){
  DemIniD2[j+1,n]<-DemIniD2[j+1,n]+(DemIniD2[j,n]-ProdD2[j,n])
  LivreOK=LivreOK}

if (DemIniD2[j,n]>StocksD2[j,n]){
  StocksD2[j,n]<-StocksD2[j-1,n]+ProdD2[j,n]
  #On decide ici de ne pas onorer la commande si le stock est insuffisa
nt.
  #La demande j+1 reste donc inchangee
  #On pourrait aussi par la suite de choisir de livrer une commande inc
omplete... a voir
  LivreOK=LivreOK-1
}

}

StocksD2[,k-1]=0

##### Pricing #####
####
#il faut alors, pour pouvoir poursuivre l'analyse, valoriser les stocks
#on considere qu'? chaque ?tape, le prix unitaire suit une loi
Fpricing=function(x){
  prix=x+1
  prix
}
IndPrixD2=data.frame()
IndPrixD2=StocksD2
colnames(IndPrixD2)=c(paste("Ind_",1:n))
IndPrixD2$`Ind_ 1`=2
for (i in 2:n){
  IndPrixD2[,i]=Fpricing(IndPrixD2[,i-1])
}

ValD2=StocksD2*IndPrixD2

ValtotD2=data.frame()

for (j in 1:T){
  ValtotD2[j,1]=sum(ValD2[j,])

```

```

}
colnames(ValtotD2)="Valorisation des stocks ? T"

##### Analyses #####
#####

colnames(Indic)=c("MaxProd", "MoyenneValTot", "MoyenneValTotaT", "LivreOK")
Indic$MaxProd[m]=max(ProdD2)
Indic$MoyenneValTot[m]=mean(ValtotD2$`Valorisation des stocks ? T`)
Indic$MoyenneValTotaT[m]=ValtotD2$`Valorisation des stocks ? T`[T]
Indic$LivreOK[m]=LivreOK
}
if (k==2){
sumup=data.frame()
for (i in 1:length(Indic[1,])){
  sumup[k,i]=mean(Indic[,i])
}
colnames(sumup)=colnames(Indic)
}
if (k>2){
for (i in 1:length(Indic[1,])){
  sumup[k,i]=mean(Indic[,i])
}
}

print(k)

}

##### Visualisation #####
#####

require(ggplot2)

## Loading required package: ggplot2

require(reshape2)

## Loading required package: reshape2

StocksD2$T=c(1:T)
StocksD2 <- melt(StocksD2 , id.vars = 'T', variable.name = 'Stocks')

# plot on same grid, each series colored differently --
# good if the series have same scale
#ggplot(df, aes(time,value)) + geom_line(aes(colour = series))

# or plot on different plots

ggplot(StocksD2, aes(x = StocksD2$T,value)) + geom_line(aes(colour = Stocks
)) + facet_grid(Stocks ~ .)

```


Annexe B : Code

```
##### Parametres #####
#####

n=10 #Notre chaine de production lin?aire et ?quilibr?e poss?de n ?tapes
k=4 #On proc?de par it?ration sur k, position du point de decouplage
T=1000 #On suppose que la demande client est exprim?e T fois
P=1000 #La production en flux pouss? de l'usine
C=1.2*P #La capacit? maximale des machines

it=5 #it?rations ? parametres (ci-dessus) constants
Indic=data.frame() #Indicateur necessaires a l'analyses, sont exprimes en fin de code
.
for (i in 1:it){
  for(j in 1:4){
    Indic[i,j]=0
  }
}

#it simulations de la m?me usine
for(m in 1:it){

  #La production flux tir?e / tranche T de prod, D, entre 0 et T
  D1=1 #vestige a supprimer in-fine
  D2=rnorm(T,P,P*0.2) #La demande varie pour tout T selon une loi normale de moyenne P
  et d'ecart type P*0.2

  #####Pre-decoupling point#####
  #####

  Travail=data.frame() #Entre 0 et T, Les machines entre 1 et N produisent selon une
  loi de Poisson de moyenne P, normalis?e
  for (i in 1:n){
    for(j in 1:T){

      Travail[i,j]=rpois(1,P)/P
    }
  }
  nomrow=c(paste("LP_",1:n))
  rownames(Travail)=nomrow
  nomcol=c(paste("P/T=",1:T))
  colnames(Travail)=nomcol

  Travail[n+1,]=P

  #####Post-decoupling point#####
  #####

  Travail[n+2,]=D1
  Travail[n+3,]=D2
```

```

nomrow=c(nomrow,"P","D cste","D norm")
rownames(Travail)=nomrow

Travail=as.data.frame(t.data.frame(Travail))#Pour travailler plus simplement

#Les stock post-DP s'expriment comme suit
##Hypoth?ses :
#Les stocks en k ? T=1 sont ?gaux ? P, les autres sont nuls.
#####POUR D2#####
StocksD2=data.frame() #On n?gllige les stocks interm?diaires en WIP avant k; il n'y
a donc PAS de WIP avant k
for (i in 1:n){
  for(j in 1:T){
    StocksD2[i,j]=0
  }
}
rownames(StocksD2)=c(paste("Stock_",1:n))
nomcol=c(paste("P/T=",1:T))
colnames(StocksD2)=nomcol
#Pour travailler plus simplement
StocksD2=as.data.frame(t.data.frame(StocksD2))

for (i in k:n) #On definit ici les stocks initiaux
{
  StocksD2[1,i]=2*P
}

DemIniD2=StocksD2 #On exprime la demande
colnames(DemIniD2)=c(paste("DemIni_",1:n))
DemIniD2[,]=0

for (j in 1:T){
  for (i in (k+1):n){
    if (j-n+i>0){
      DemIniD2[j,i]=Travail[j-n+i,n+3]
    }
    else
      {DemIniD2[j,i]=0}
  }
}
#Cette demande sera reactualisee a chaque j, entre 2 et T, avec la demande residuel
le

#Production ? capacite? finie C
ProdDesD2=StocksD2
colnames(ProdDesD2)=c(paste("Prod_",1:n))
ProdDesD2[,]=0
ProdMaxD2=ProdDesD2
ProdD2=ProdDesD2

#Cest la vraie prod
#ProdDesD2 est la production que l'on peut realiser vu les machines et la demande
#ProdMaxD2 est la production que l'on peut realiser vu les machines et les stocks, e
t la capacite max des machines
#ProdD2 est la production que l'on realise

```

```

for (j in 1:T) #prod k, production au niveau du point de decouplage, on considere qu
'elle depend encore des previsions et est toujours alimentee de P produits
{
  ProdDesD2[j,k]=P*Travail[j,k]
  ProdD2[j,k]=ProdDesD2[j,k]
}

for (j in 2:T) #Production reelle
{

  for (i in (k+1):n) #On d?fini la prod desiree a j
  {
    #ProdDesD2[1,n]=DemIniD2[1,n]*Travail[1,n]
    ProdDesD2[j,i]= DemIniD2[j,i]*Travail[j,i]
  }

  for (i in (k+1):n) #On d?fini la prod max a j
  {
    cste=(StocksD2[j-1,i-1]*Travail[j,i])
    ProdMaxD2[j,i]= min(cste,C)
  }

  for (i in (k+1):n) #Production effective
  {
    ProdD2[j,i]=min(ProdDesD2[j,i],ProdMaxD2[j,i])
  }

  for (i in k:n-1) #avant l'etape de livraison
  {
    StocksD2[j,i]<-StocksD2[j-1,i]-ProdD2[j,i+1]+ProdD2[j,i]
    DemIniD2[j+1,i]<-DemIniD2[j+1,i]+DemIniD2[j,i]-ProdD2[j,i]
  }

  if (j==2) #Taux de service
  {LivreOK=T}

  StocksD2[j,n]<-StocksD2[j-1,n]-DemIniD2[j,n]+ProdD2[j,n] #Expression des stocks S
I L'on peut livrer la commande integralement

  if (DemIniD2[j,n]<=StocksD2[j,n]){
    DemIniD2[j+1,n]<-DemIniD2[j+1,n]+(DemIniD2[j,n]-ProdD2[j,n])
    LivreOK=LivreOK}

  if (DemIniD2[j,n]>StocksD2[j,n]){
    StocksD2[j,n]<-StocksD2[j-1,n]+ProdD2[j,n]
    #On decide ici de ne pas onorer la commande si le stock est insuffisant.
    #La demande j+1 reste donc inchangee
  }
}

```



```

    #On pourrait aussi par la suite de choisir de livrer une commande incomplete...
    a voir
    LivreOK=LivreOK-1
  }

}

StocksD2[,k-1]=0

##### Pricing #####
#il faut alors, pour pouvoir poursuivre l'analyse, valoriser les stocks
#on consid?re qu'? chaque ?tape, le prix unitaire suit une loi
FPricing=function(x){
  prix=2*x
  prix
}
IndPrixD2=data.frame()
IndPrixD2=StocksD2
colnames(IndPrixD2)=c(paste("Ind_",1:n))
IndPrixD2$`Ind_ 1`=2
for (i in 2:n){
  IndPrixD2[,i]=FPricing(IndPrixD2[,i-1])
}

ValD2=StocksD2*IndPrixD2

ValtotD2=data.frame()

for (j in 1:T){
  ValtotD2[j,1]=sum(ValD2[j,])
}
colnames(ValtotD2)="Valorisation des stocks ? T"

##### Analyses #####
library(moments)

nomaajouter=character()
for(i in k:n) #Moyenne des stocks
{
  Indic[m,(i-k+1+4)]=mean(StocksD2[,i])
  nomaajouter=c(nomaajouter,paste("MoyStock_",i))
}
for(i in k:n) #Variance des stocks
{
  Indic[m,(i-k+1+4+(n-k+1))]=var(StocksD2[,i])
  nomaajouter=c(nomaajouter,paste("VarStock_",i))
}
for(i in k:n) #Skewness des stocks
{
  Indic[m,(i-k+1+4+2*(n-k+1))]=skewness(StocksD2[,i])
  nomaajouter=c(nomaajouter,paste("SkewStock_",i))
}
for(i in k:n) #Kurtosis des stocks

```

```

{
  Indic[m,(i-k+1+4+3*(n-k+1))]=kurtosis(StocksD2[,i])
  nomaajouter=c(nomaajouter,paste("KurtStock_",i))
}

colnames(Indic)=c("MaxProd","MoyenneValTot","MoyenneValTotaT","LivreOK",nomaajouter)
Indic$MaxProd[m]=max(ProdD2)
Indic$MoyenneValTot[m]=mean(ValtotD2`Valorisation des stocks ? T`)
Indic$MoyenneValTotaT[m]=ValtotD2`Valorisation des stocks ? T`[T]
Indic$LivreOK[m]=LivreOK
}

sumup=data.frame()
for (i in 1:length(Indic[1,])){
  sumup[1,i]=mean(Indic[,i])
}
colnames(sumup)=colnames(Indic)

##### Visualisation #####

library(ggplot2)
library(reshape2)
StocksD2$T=c(1:T)
StocksD2 <- melt(StocksD2 , id.vars = 'T', variable.name = 'Stocks')

# plot on same grid, each series colored differently --
# good if the series have same scale
#ggplot(df, aes(time,value)) + geom_line(aes(colour = series))

# or plot on different plots

ggplot(StocksD2, aes(x = StocksD2$T,value)) + geom_line(aes(colour = Stocks)) + facet_
grid(Stocks ~ .)

```


Annexe C : Résultats des simulations pour différents n. En gris le taux de service et en noir la valorisation des stocks.

