

5^{ème} Conférence internationale d'Innovation et Engineering Management

IEM - 2017

**PLANIFICATION OPERATIONNELLE DU PROBLEME INTEGRE PRODUCTION-
STOCKAGE AVEC PRISE EN COMPTE DES CONTRAINTES DE NOMENCLATURE**

CAS DE LA CHAINE LOGISTIQUE AUTOMOBILE

Elaboré par Mariem Marzougui
Ingénieur industriel diplômée
de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Bizerte

Encadré par Dr. Imen SAFRA
Université Tunis El Manar, Ecole Nationale
d'Ingénieurs de Tunis, Laboratoire d'Analyse,
de Conception et de commande des systèmes, BP
37, Le Belvedere 1002, Tunis

RESUME : L'objet de ce travail est de développer une approche intégrant la planification de la production et du stockage dans la chaîne logistique d'une industrie automobile. En effet, la globalisation croissante et la concurrence accrue obligent les entreprises d'automobile d'avoir une relation de plus en plus étroite entre les différentes fonctions de leur chaîne logistique (CL) afin de réduire les niveaux de stocks et avoir un système plus flexible capable de satisfaire les clients dans les délais exigés et à moindre coût. Une optimisation intégrée de la production et du stockage implique une meilleure synchronisation entre les activités de production et les mouvements des stocks. Ce problème est modélisé au niveau opérationnel sous forme d'un programme linéaire en nombres entiers. L'approche proposée vise la maximisation de la productivité en se basant sur une maximisation en alternance entre les activités de production et du stockage, en tenant compte des contraintes liées aux capacités et à la nomenclature.

MOTS-CLES : production, stockage, programmation linéaire, optimisation intégrée, planification opérationnelle

1 Introduction

La chaîne logistique (CL) n'a pas une définition universelle. La littérature nous propose un large panel. Parmi ces définitions, nous présentons celle de Lee et Billington (1993) qui définit la chaîne logistique comme un ensemble d'acteurs, qui sont les fournisseurs, les producteurs, les distributeurs et les clients, se coordonnant par des liens physiques et informationnels. Cette interaction entre les différents maillons de la chaîne assure la transformation des matières premières en des produits finis livrés aux clients. Cette CL interconnecte les liens entre un maillon en amont, qui assure la planification des approvisionnements, et un maillon en aval qui concerne l'acheminement des produits jusqu'aux clients ou détaillants. Avec l'apparition des concepts Lean et les progrès technologiques, l'optimisation séparée des fonctions de la CL ne présente plus une solution pertinente dans un environnement de plus en plus concurrentiel et des clients de plus en plus exigeants concernant le délai et la qualité. En effet, ce découplage entre les acteurs de la chaîne entraîne des encours importants qui engendrent des coûts de stockage élevés ce qui rend le système peu agile pour répondre aux besoins de clients. D'où l'apparition de la notion de l'optimisation intégrée. Son objectif principal est d'assurer une meilleure coordination entre les fonctions de la CL donc une optimisation de la performance industrielle. C'est pour cette raison que les travaux de recherche se concentrent de plus en plus sur l'optimisation intégrée des activités de la CL. Il existe plusieurs avantages pour la modélisation intégrée tels que la réduction des coûts de stockage, une commercialisation plus rapide du produit et une plus grande visibilité en terme de la demande.

Ce papier est structuré selon 7 sections. Après l'introduction, nous présentons, à la section 2, un état de l'art. A la section 3, nous présentons l'approche proposée pour traiter le problème de planification intégrée production-stockage au niveau opérationnel. La section 4 est dédiée à la modélisation du problème sous forme d'un programme linéaire. Dans la section 5, les résultats obtenus seront représentés en illustrant un exemple explicatif. Dans la section 6, une analyse de sensibilité sera exposée et nous terminons par quelques conclusions et perspectives développant nos futurs axes d'étude.

2 ETAT DE L'ART

Plusieurs travaux se sont intéressés à l'optimisation intégrée des activités de la CL. Dans la littérature, ces travaux peuvent être classés selon les fonctions à intégrer et les niveaux de décision considérés. En effet, les modèles intégrés de la production, du stockage et de la distribution au niveau tactique peuvent être trouvés dans Erenguç et al. (1999). Dror, Ball (1987) et Chandra (1993) qui ont traité la coordination entre l'activité du stockage et celle de la distribution au niveau tactique. Des revues d'études des problèmes de localisation ont été fournies par Canel Et Khumawala (1997). Ils ont formulé un modèle de programmation mixte (MIP) et l'ont résolu en utilisant l'algorithme de *branch and bound* pour étudier les emplacements optimaux des entrepôts afin de déterminer les niveaux de production et d'expédition. Lei et al. (2006) ont utilisé une méthode biphasée simultanément pour résoudre les problèmes de production, du stockage et de tournées de véhicules. Dasci et Verter (2001) ont considéré les coûts et la demande approximatifs pour intégrer les fonctions de production et de distribution afin de minimiser les coûts fixes de la localisation et les coûts de transport. Kumanan et al. (2007) ont développé deux techniques de recherche pour minimiser les coûts totaux de production et de distribution. Camm et al. (1997) ont intégré les problèmes de localisation et d'approvisionnement au niveau tactique. Lodree et al. (2004) ont proposé l'intégration de l'attente des clients avec les activités de production et de distribution pour déterminer le taux de production et la séquence des expéditions de véhicules. Bashiri et al. (2012) ont présenté un modèle mathématique au niveau stratégique et tactique intégrant les activités de la production et de distribution. Yu, Normasari, and Manuel. David, Josefa.M (2015) ont traité l'intégration des activités de production, du stockage et de distribution au niveau tactique. Devangan (2016) a développé un modèle intégré de la planification de production et distribution (PIPD) au niveau tactique.

Cependant, à notre connaissance, le problème d'intégration de la production et du stockage au niveau opérationnel appliqué à l'industrie automobile n'est pas traité jusque-là. Ce qui fera l'objet de notre approche proposée.

3 .APPROCHE PROPOSEE

Notre approche de planification vise l'intégration des activités de production et du stockage, au niveau opérationnel, dans une chaîne logistique qui fabrique plusieurs types des produits avec une capacité de production et du stockage limitée. Contrairement aux modèles d'intégration proposés dans la littérature qui visent soit la minimisation des coûts (Normasari and Luong, 2015), soit la maximisation du profit (Devangan, 2016), notre approche permet la maximisation de la production et du stockage ainsi que la détermination du nombre des machines nécessaires. Le fait de parler de la maximisation du stockage va mener vers des doutes sur l'optimalité de la solution. Mais en réalité, c'est une maximisation conditionnelle entre l'activité de production et du stockage. Ceci sera clarifié dans ce qui suit.

Dans le modèle proposé, nous nous intéressons à deux niveaux de production dans la zone métal : Toronnage et Tréfilage. Ainsi, les contraintes liées à la nomenclature sont aussi présentées. Vu que la production dans la zone tréfilage est basée sur l'alternance entre les articles de même catégorie sur la même machine, nous adoptons une approche de planification spécifique. En effet, l'atteinte d'un stock maximal pour un article j signifie que sa production est suspendue jusqu'à l'atteinte d'un stock minimal. Le temps où la production est suspendue pour cet article, la production d'article j +1 est déclenchée et ainsi de suite. Concernant la gestion de production dans la zone toronnage, nous visons la maximisation de la production de la même manière sauf que le problème d'alternance entre les produits ne se présente pas. Ce modèle permet aussi de déterminer le nombre des toronneuses nécessaires dans cette zone. Les figures ci-dessous illustrent bien ces notions de seuils définis pour la planification de la production dans la zone métal.

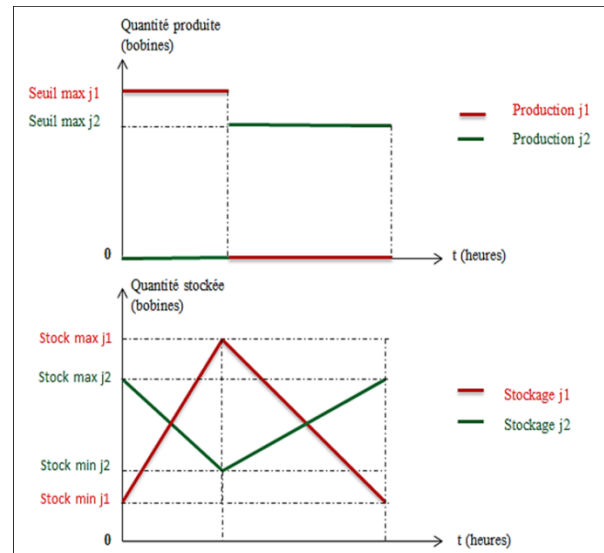


Figure 1: Seuils définis pour la planification de la production dans la zone tréfilage

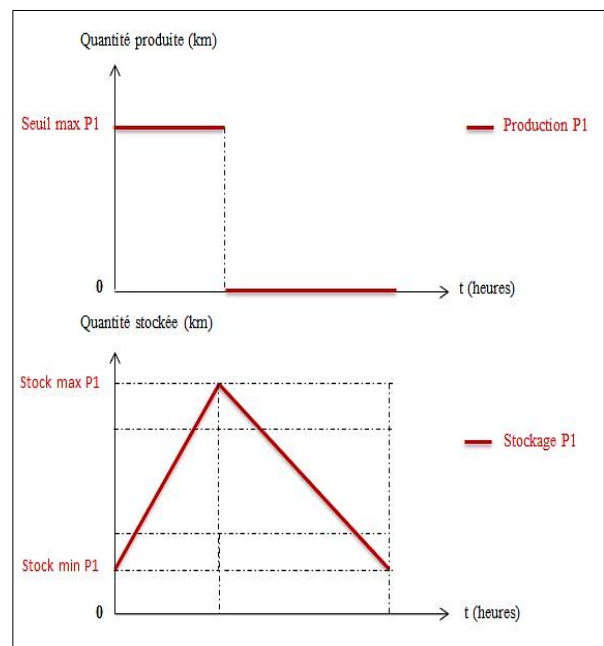


Figure 2: Seuils définis pour la planification de la production dans la zone toronnage

4 DESCRIPTION ET MODELISATION DU PROBLEME

4.1 Description du problème

Le problème modélisé est construit en s'inspirant d'un cas d'étude réel, celui d'une industrie de fabrication de câbles électriques dédiés au secteur d'automobile. Le problème fait intervenir les unités de production internes de l'entreprise : Zone tréfilage et zone toronnage. Ainsi, il s'agit d'un

modèle multi-produit, multi-article, multi-niveau et multi-période. Notre modèle traité au niveau opérationnel, sur un horizon d'une semaine avec une périodicité journalière, vise la maximisation de la productivité en tenant compte des contraintes liées à la nomenclature (besoins en articles entre produits). Ainsi, non seulement les contraintes de capacité doivent être satisfaites afin de garantir des solutions réalisables au niveau opérationnel, mais aussi nous devons garantir une cohérence entre les deux niveaux de production (tréfilage et toronnage). De ce fait, le modèle décidera de la quantité produite et stockée des produits ainsi que des articles et le nombre nécessaire de machines pour satisfaire la demande sur chaque poste.

4.2 Formulation du problème

Les ensembles

T : ensemble des périodes ; $t \in T$

P : ensemble des produits ; $p \in P$

A : ensemble des articles ; $j \in A$

Les paramètres de stockage

$Imax_p$: Capacité maximale de stockage du produit p (exprimée en unité de longueur : km).

$Imin_p$: Capacité minimale de stockage du produit p (exprimée en unité de longueur : km).

$Itremax_j$: Capacité maximale de stockage de l'article j (exprimée en nombre d'unités : bobines).

$Itremin_j$: Capacité minimale de stockage de l'article j (exprimée en nombre d'unités : bobines).

Slp_p : Stock initial du produit p (exprimée en unité de longueur : km).

Sla_j : Stock initial de l'article j (exprimé en nombre d'unités : bobines).

Les paramètres de capacités et de durées

d_{pt} : Demande de produit p à satisfaire à la fin de la période t (exprimée en unité de longueur : km)

C_{pj} : Composition de produit p.

cap_p : Capacité de production du produit p (exprimée en unité de longueur : km)

$captr_j$: Capacité de production de l'article j (exprimée en nombre d'unités : bobines)

ucs_j : Capacité d'une bobine de l'article j (exprimée en unité de longueur : km)

$seuiltr_j$: Seuil minimal de la production d'article j (exprimé en nombre d'unités : bobines)

$seuil_p$: Seuil minimal de la production du produit p (exprimé en unité de longueur : km)

M : nombre très petit

V_p : Vitesse moyenne utilisée pour la production du produit p

z : constante de conversion

Pas_p : Le pas utilisé dans la production du produit p

RT : la valeur objective de l'indicateur de performance « Running time » pour la production de produit p.

nbheure : nombre d'heures de travail par période t (exprimé en heures).

Les expressions

Le besoin d'article j (exprimé en nombre d'unités : bobines) :

$$BS_{jt} = \sum_{p \in P} (P_{pt} * \frac{C_{pj}}{ucs_j})$$

La quantité du produit p produite par heure (exprimée en unité de longueur : km) :

$$prodheurt_d_p = V_p * Pas_p * z$$

La quantité du produit p produite par poste (exprimée en unité de longueur : km) :

$$prodposte_p = prodheurt_d_p * RT * nbheure$$

Les variables de décision

P_{pt} : Quantité de produit p produite durant la période t (exprimée en unité de longueur : km)

$Ptre_{jt}$: Quantité d'article j produite durant la période t (exprimée en nombre d'unités : bobines)

$besoin_{jt}$: Quantité d'article j nécessaire à la production du produit p durant la période t (exprimée en nombre d'unités : bobines)

b_{pt}, a_{jt} : Variables intermédiaires utilisées dans les contraintes de gestion de la production (3)

$nbTD_{pt}$: Nombre de machines nécessaire à la production du produit p durant la période t

I_{pt} : Niveau de stock du produit p à la fin de la période t (exprimée en unité de longueur : km)

$Itre_{jt}$: Niveau de stock d'article j à la fin de la période t (exprimé en nombre d'unités : bobines)

Fonction objectif

La fonction objective vise la maximisation de la productivité à travers la maximisation de la production (1) et (2) et du stockage (3) et (4). C'est une maximisation conditionnelle entre ces deux activités ayant pour objectif de minimiser le nombre de changements des outillages.

La production de torons :

$$\sum_{p \in P} \sum_{t \in T} P_{pt} \quad (1)$$

La production de tréfilées

$$\sum_{j \in A} \sum_{t \in T} Ptre_{jt} \quad (2)$$

Le stockage de tréfilées
 $\sum_{j \in A} \sum_{t \in T} I_{tre_j t}$ (3)

Le Stockage de torons :
 $\sum_{p \in P} \sum_{t \in T} I_{pt}$ (4)

Contraintes

1) Contraintes relatives à l'activité du stockage
 $I_{p1} = SIp_p + P_{p1} - d_{p1} \quad p \in P$ (1)

$I_{p,t+1} = I_{pt} + P_{p,t+1} - d_{p,t+1}$
 $p \in P ; t \in T$ (2)

Les contraintes (1) et (2) déterminent le niveau de stock du produit p à la fin du période t.

$\begin{cases} besoin_{jt} \geq BS_{jt} \\ BS_{jt} \geq besoin_{jt} - 1 + M \end{cases}$ (3)

Rappelons que l'application de la fonction Arrondi () sur les variables de décision n'est pas autorisée. De ce fait, La contrainte (3) assure la conversion du besoin d'article j (exprimé en unité de longueur : km) en nombre d'unités. Ce besoin sera injecté dans les contraintes (4) et (5).

$I_{tre_{j1}} = SIa_j - besoin_{j1} \quad j \in A$ (4)

$I_{tre_{j,t+1}} = I_{tre_{jt}} + P_{pt+1} - besoin_{j,t+1}$
 $j \in A ; t \in T$ (5)

Les contraintes (4) et (5) déterminent le niveau de stock d'article j à la fin de la période t. Ces deux contraintes assurent, ainsi, La synchronisation des deux niveaux de production à travers la logique MRP qui consiste à décider de la quantité d'article j produite en tenant compte de la production du produit p.

$I_{min_p} \leq I_{pt} \leq I_{max_p}$
 $p \in P ; t \in T$ (6)

$I_{trem_{jt}} \leq I_{tre_{jt}} \leq I_{trem_{jt}}$
 $j \in A ; t \in T$ (7)

Ces contraintes délimitent la capacité de stockage du produit p et de l'article j

2) Contraintes relatives à l'activité de production
 $P_{pt} \leq cap_p \quad p \in P ; t \in T$ (8)

$P_{tre_{jt}} \leq cap_{tre_j} \quad j \in A ; t \in T$ (9)

Cette famille de contraintes cerne la capacité de production. De ce fait, la production du produit p et celle d'article j ne doivent pas excéder les capacités maximales de la production.

$\begin{cases} cap_p \geq I_{max_p} + d_{p1} - SIp_p \\ \Rightarrow b_{p1} = I_{max_p} + d_{p1} - SIp_p \\ cap_p \leq I_{max_p} + d_{p1} - SIp_p \\ \Rightarrow b_{p1} = cap_p \\ p \in P \end{cases}$ (10)

$\begin{cases} cap_p \geq I_{max_p} + d_{p,t+1} - I_{pt} \\ \Rightarrow b_{p,t+1} = I_{max_p} + d_{p,t+1} - I_{pt} \\ cap_p \leq I_{max_p} + d_{p,t+1} - I_{pt} \\ \Rightarrow b_{p,t+1} = cap_p \\ p \in P ; t \in T \end{cases}$ (11)

$\begin{cases} cap_{tre_j} \geq I_{trem_{j,1}} + besoin_{j,1} - SIa_j \\ \Rightarrow a_{j1} = I_{trem_{j,1}} + besoin_{j,1} - SIa_j \\ cap_{tre_j} \leq I_{trem_{j,1}} + besoin_{j,1} - SIa_j \\ \Rightarrow a_{j1} = cap_{tre_j} \\ j \in A \end{cases}$ (12)

$\begin{cases} cap_{tre_j} \geq I_{trem_{j,t+1}} + besoin_{j,t+1} - SIa_j \\ \Rightarrow a_{jt} = I_{trem_{j,t+1}} + besoin_{j,t+1} - SIa_j \\ cap_{tre_j} \leq I_{trem_{j,t+1}} + besoin_{j,t+1} - SIa_j \\ \Rightarrow a_{j,t+1} = cap_{tre_j} \\ j \in A ; t \in T \end{cases}$ (13)

Cette famille de contraintes (10), (11), (12) et (13) intervient dans les contraintes (14) et (15) : En effet, au niveau de ces contraintes, nous introduisons deux variables intermédiaires a_{jt} et b_{pt} qui prennent le minimum entre la capacité de production et la quantité produite nécessaire pour avoir un stock max. L'introduction de ces deux variables dans les contraintes (14) et (15) assure l'exploitation maximale de la capacité de production.

$P_{pt} \neq 0 \Rightarrow \begin{cases} P_{pt} = b_{pt} \\ P_{pt} \geq seuil_p \end{cases}$
 $p \in P ; t \in T$ (14)

$P_{tre_{jt}} \neq 0 \Rightarrow \begin{cases} P_{tre_{jt}} = a_{jt} \\ P_{tre_{jt}} \geq seuil_{tre_j} \end{cases}$
 $j \in A ; t \in T$ (15)

Outre l'exploitation maximale de la capacité de production, Ces contraintes garantissent que l'activité de production ne peut pas avoir lieu que si elle est délimitée par un seuil minimal.

$\begin{cases} P_{pt} = 0 \\ I_{pt} \geq d_{p,t+1} + I_{min_p} \Rightarrow P_{p,t+1} = 0 \\ p \in P ; t \in T \end{cases}$ (16)

$$\begin{cases} Ptre_{jt} = 0 \\ Utre_{jt} \geq \text{besoin}_{j,t+1} + Itremin_j \end{cases}$$

$$\Rightarrow Ptre_{j,t+1} = 0, j \in A ; t \in T \quad (17)$$

En se basant sur les contraintes (14) et (15), les contraintes (16) et (17) garantissent qu'une fois le stock max est atteint, l'activité de production est suspendue jusqu'à l'atteinte d'un stock min.

$$P_{pt} \leq nbTD_{pt} * \text{prodheurposte}_p$$

$$p \in P ; t \in T \quad (18)$$

Cette famille de contraintes détermine le nombre de machines nécessaires à la production du produit p durant la période t.

3) Contraintes relatives aux liens de dépendances entre les articles j

$$Ptre_{jt} = 0 \Rightarrow Ptre_{j+1,t} = 0$$

$$j = 1 ; t \in T \quad (19)$$

$$Ptre_{jt} \neq 0 \Rightarrow Ptre_{j+2,t} = 0$$

$$j = 1 ; t \in T \quad (20)$$

Ces contraintes concernent les articles j ayant une petite section. En effet, (19) assure que les deux premiers articles sont fabriqués au cours de la même période t. Alors que (20) impose que le troisième article ne soit pas fabriqué au cours de la même période t que les deux premiers articles.

$$Ptre_{jt} \neq 0 \Rightarrow \begin{cases} Ptre_{j+1,t} = 0 \\ Ptre_{j+2,t} = 0 \end{cases}$$

$$j = 4 ; t \in T \quad (21)$$

$$Ptre_{jt} = 0 \Rightarrow Ptre_{j+1,t} = 0$$

$$j = 5 ; t \in T \quad (22)$$

Ces contraintes concernent les articles j ayant une moyenne section. En effet, (21) assure que le 4^{ème} article soit fabriqué séparément des autres articles de section proche dans une période t. Alors que (22) impose que les deux derniers articles, de la même catégorie, soient fabriquées dans la même période t.

$$Ptre_{jt} \neq 0 \Rightarrow Ptre_{j+1,t} = 0$$

$$j = 7 ; t \in T \quad (23)$$

Ces contraintes concernent les articles j ayant une grande section. En effet, (23) assure que les deux

articles de cette catégorie ne soient pas fabriqués au cours de la même période t.

4) Contraintes de signe

$$\begin{array}{ll} P_{pt} \in \mathbb{N} & p \in P ; t \in T \\ Ptre_{jt} \in \mathbb{N} & j \in A ; t \in T \\ I_{pt} \in \mathbb{N} & p \in P ; t \in T \\ Itre_{jt} \in \mathbb{N} & j \in A ; t \in T \\ nbTD_{pt} \in \mathbb{N} & p \in P ; t \in T \\ a_{jt} \in \mathbb{N} & j \in A ; t \in T \\ b_{pt} \in \mathbb{N} & p \in P ; t \in T \\ besoin_{jt} \in \mathbb{N} & j \in A ; t \in T \end{array}$$

5 EXPERIMENTATION ET RESULTATS

Nous considérons, dans notre approche, un horizon de planification hebdomadaire. En effet, les quantités produites et stockées seront détaillées au niveau opérationnel par poste. Nous avons testé notre approche durant un mois. Dans notre expérimentation, afin de réduire le temps de traitement et faciliter les mises à jour des données, nous avons découpé le modèle initial en trois sous modèles en se basant sur la catégorie d'articles j (faible section (M01), moyenne section (M02), grande section (M03)). Chaque catégorie d'articles est fabriquée sur une seule machine. Donc, le problème d'affectation des machines aux postes ne se pose pas dans notre cas.

5.1 Présentation d'un exemple illustratif

Dans cette section, nous présentons, parmi les trois sous modèles, le modèle concernant les articles de moyenne section afin d'illustrer le modèle principal puisque il s'agit de même principe. Les demandes au niveau opérationnel du client interne (zone extrusion) sont connues et constantes par semaine. Selon la nomenclature de chaque produit, les plans de production de la zone tréfilage et torronage sont établis. Les données du modèle sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 1: Les données du problème

Produit	Demande /poste (km)	Article utilisé	Quantité (bobines)
P1	660	A1	1
P2	134	A2	5
		A3	1
P3	73	A3	3

Afin de rendre le système plus flexible et satisfaire les demandes tout en garantissant une exploitation optimale des ressources, nous avons fixé les capacités maximales de stockage des produits (torons) de manière à ce que ces stocks assurent la couverture de trois jours alors que le seuil maximal de stockage des articles (tréfilés) dépend du nombre de rails disponibles. Concernant les stocks minimaux, ils sont fixés de façon qu'ils combent le besoin d'un poste. Les capacités de production et du stockage pour les produits ainsi que pour les articles sont présentées dans le tableau 2.

Tableau 2: Les capacités de production et du stockage

		Capacité de production	Capacité du stockage
Produits (km)	P1	700	6000
	P2	200	1300
	P3	100	700
Articles (bobines)	A1	15	60
	A2	9	60
	A3	6	20

CPLEX version V12.3. La solution optimale est obtenue en 8.40s. Notre approche de planification est appliquée sur un mois. Donc, ce modèle est simulé 4 fois. La quantité moyenne stockée dans la zone tréfilage est égale à 49 unités pour une quantité de 5037.5 km dans la zone toronnage. Les résultats sont présentés sur une fiche Excel intégrée (figure1, figure2) dans le solveur Cplex. Le plan de production sur une semaine pour la zone tréfilage est présenté sur la figure ci-dessous.

Le modèle, ainsi modélisé, contient 1380 contraintes et 2266 variables dont 1761 binaires. Il est résolu en utilisant le package IBM ILOG

		Tréfilage								
		7*0,256			8*0,245			10*0,245		
Jour	Poste	Production	Stock	Besoin	Production	Stock	Besoin	Production	Stock	Besoin
1	P1	0	43	6	9	22	7	6	16	4
	P2	0	37	6	9	31	0	6	19	3
	P3	0	31	6	9	40	0	4	20	3
2	P1	0	25	6	0	40	0	0	17	3
	P2	0	19	6	0	40	0	0	14	3
	P3	0	13	6	0	40	0	0	14	0
3	P1	0	7	6	0	40	0	0	14	0
	P2	15	16	6	0	40	0	0	14	0
	P3	15	25	6	0	40	0	0	14	0
4	P1	15	34	6	0	33	7	0	12	2
	P2	15	43	6	0	26	7	0	10	2
	P3	15	52	6	0	19	7	0	8	2
5	P1	14	60	6	0	12	7	0	6	2
	P2	0	54	6	0	5	7	0	2	4
	P3	0	48	6	9	7	7	6	4	4
6	P1	0	42	6	9	9	7	6	6	4
	P2	0	36	6	9	11	7	6	8	4
	P3	0	30	6	9	13	7	6	10	4
7	P1	0	24	6	9	15	7	6	12	4
	P2	0	18	6	9	17	7	6	14	4
	P3	0	12	6	9	19	7	6	16	4

Figure 2 : Plan de production des articles M02 sur une semaine

A travers la figure précédente, nous remarquons que la production de l'article 8*0,245 s'achève à la fin du 1^{ème} jour alors que la production de l'article 7*0,256 ne commence qu'à partir du 3^{ème} jour sur le

deuxième poste. La présence de 4 postes vides est dû au fait que le stock de l'article 7*0.256 n'atteint son stock minimal de 6 unités qu'à la fin du 1^{er} poste du 3^{ème} jour. Cet exemple valide bien notre

approche qui exige que la production ne peut pas avoir lieu que lorsque le stock min est atteint. Le

même principe est illustré par le plan de production pour la zone toronage (figure 2).

Toronage								
YA0035			YB0250			YB0150		
Production	Nb Id	Stock	Production	Nb Id	Stock	Production	Nb Id	Stock
700	12	4340	184	2	1300	100	2	577
700	12	4380	0	0	1166	100	2	604
700	12	4420	0	0	1032	100	2	631
700	12	4460	0	0	898	100	2	658
700	12	4500	0	0	764	100	2	685
700	12	4540	0	0	630	0	0	612
700	12	4580	0	0	496	0	0	539
700	12	4620	0	0	362	0	0	466
700	12	4660	0	0	228	0	0	393
700	12	4700	200	2	294	0	0	320
700	12	4740	200	2	360	0	0	247
700	12	4780	200	2	426	0	0	174
700	12	4820	200	2	492	0	0	101
700	12	4860	200	2	558	100	2	128
700	12	4900	200	2	624	100	2	155
700	12	4940	200	2	690	100	2	182
700	12	4980	200	2	756	100	2	209
700	12	5020	200	2	822	100	2	236
700	12	5060	200	2	888	100	2	263
700	12	5100	200	2	954	100	2	290
700	12	5140	200	2	1020	100	2	317

Figure 3: Plan de production pour les produits M02 sur une semaine

5.2 L'évaluation des gains

La simulation de trois modèles M03, M02 et M03 induisent une quantité moyenne stockée dans la zone tréfilage équivalente à 187 unités pour une quantité de 9183.5 km dans la zone toronage. Dans le reste de cette partie, nous nous intéressons aux gains apportés par l'approche de planification adoptée.

247 bobines stockées dans la zone tréfilage. Pour une capacité d'un rail de stockage égal à 10 bobines, nous avons gagné l'espace de **25 rails**. D'autre part, la quantité stockée dans la zone toronage a diminué de **57899 km**. Ainsi, un gain de **86.3%** est estimé. Ces gains sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Notre système a apporté des améliorations remarquables au niveau de l'activité de stockage. D'une part, nous avons réalisé un gain de

Tableau 3: les gains apportés au niveau de l'activité de stockage

	Etat initial	Les quantités stockées (état après)					
		Fin S1	Fin S2	Fin S3	Fin S4	Quantité moyenne stockée	Gain réalisé
Zone tréfilage (bobines)	434	186	142	228	191	187	247
Zone toronage (km)	67082,5	11164	10586	6338	8646	9183.5	57899

La minimisation des encours a engendré une diminution du temps de réponse de notre système de production; le Lead Time. En effet, le temps en stock actuel est **16.12 jours** pour une valeur égale à **43,83 jours** au début du projet. Ainsi, le nouveau lead time vaut **16,91 jours** tandis qu'il a été **44.62 jours**. Donc, il est réduit de **27.71 jours**. Ce qui est équivalent à un gain de **62.10%**.

Notre approche de production se base essentiellement sur la synchronisation entre l'activité de production et celle de stockage. Le fait de poursuivre la production jusqu'à l'atteinte d'un stock max puis la suspendre jusqu'à l'atteinte d'un stock min nous a permis de minimiser le nombre de changement des filières de 8 changements par semaine. La diminution du nombre de changement des filières a augmenté le temps productif de la machine tréfileuse. Ainsi, nous avons dépassé l'objectif visé pour l'indicateur de performance « Running time ». En effet, le taux productif a atteint **95%** contre un objectif fixé de **85.5%** et une valeur initiale de **76%**. Donc, le gain en termes de temps est estimé de **19%**. Notre modèle permet de déterminer non seulement les quantités à produire et à stocker mais aussi le nombre nécessaire des machines dans la zone toronnage pour satisfaire les demandes clients. Ce nombre se base sur la quantité réelle produite non demandée. Ainsi, nous avons exploité un nombre de toronneuses juste nécessaire et nous avons pu éviter le surnombre. En effet, le nombre de toronneuses a diminué de **4 machines**.

6 ANALYSE DE SENSIBILITE

Le Running time est un indicateur très important qui nous renseigne sur le temps productif de la machine. Cet indicateur est influencé essentiellement par le nombre de changements des filières. En effet, la production en alternance des articles de même catégorie sur la même machine dans la zone tréfilage peut affecter cet indicateur une fois il y a augmentation de la demande. Ainsi, il est crucial d'évaluer l'effet de cette augmentation sur cet indicateur à travers l'évaluation de l'aptitude de notre approche à répondre à ces demandes.

6.1 Simulations et résultats

Dans notre expérimentation, nous avons choisi d'étudier l'effet de l'augmentation de la demande des produits dont leurs compositions sont les articles de moyenne section (M02) puisqu'ils sont

les plus utilisés dans les lignes de production. La demande a augmenté de 30% sur une semaine. Les résultats de cette variation sont présentés dans la figure ci-dessous.

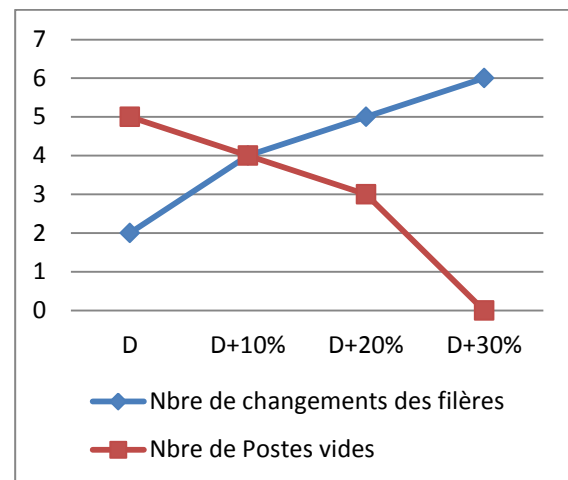


Figure 4: L'effet de l'augmentation de la demande sur le planning de production

A travers la figure précédente, nous remarquons que le nombre de changement des filières a augmenté 3 fois lors de l'augmentation de la demande de 30%. Alors que tous les postes durant la semaine sont exploités et ceci est expliqué par la grande charge sur le système de production.

6.2 Interprétations

L'augmentation de la demande a engendré l'augmentation du nombre de changement des filières et la diminution du nombre des postes vides dans le planning de production. Ce qui nous amène à déduire que le système a choisi la production des articles en alternance rapide sur toute la semaine afin de répondre aux besoins importants de la ligne de toronnage. Notre système a réussi de répondre à l'augmentation de 30% de la demande mais l'augmentation du nombre de changement va affecter d'une façon remarquable l'indicateur de Running time. Donc, se procurer une autre machine tréfileuse est une alternative à étudier et devient même une nécessité dans l'avenir afin d'avoir un compromis entre la maximisation de la production et le maintien de l'indicateur de Running time à l'objectif visé.

7 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Dans ce travail, une approche de planification opérationnelle de la production et de stockage a été développée. Une approche qui se base sur la cohérence et la synchronisation entre les deux

phases de la production dans la zone métal en tenant compte des contraintes liées aux capacités et à la nomenclature. Notre approche a montré son intérêt à travers les résultats intéressants que nous avons réalisés. En effet, nous avons réussi à minimiser les encours de **86.3 %** dans la zone toronnage, réalisé un gain d'espace de **25 rails** dans la zone tréfilage, réduit le temps de séjour de **27.71 jours**, augmenté le temps productif de la tréfileuse de **19 %**, réduit le nombre des toronneuses de **4 machines**. Ces résultats soulignent une meilleure coordination et synchronisation entre les deux phases de production dans la zone métal ainsi qu'un bon témoignage de l'importance de l'optimisation intégrée de la production et du stockage au niveau opérationnel. Dans ce travail, l'intégration des activités de la production et du stockage au niveau opérationnel a permis de réaliser des gains importants. Mais les opportunités et les défis ne s'arrêtent pas à ce stade. Ce n'est qu'un début dans une démarche d'optimisation. Ainsi, il est indispensable de noter que la gestion de la CL est structurée sur trois niveaux décisionnels : stratégique, tactique et opérationnel. Cette hiérarchisation engendre une planification par étapes séparés empêchant généralement d'avoir des solutions cohérentes et réalisables. Ainsi, l'intégration de ces niveaux s'est imposée comme une piste intéressante à explorer pour les entreprises ainsi que les chercheurs.

REFERENCES

Bashiri, M., Badri H. and Talebi J. (2012). A new approach to tactical and strategic planning in production-distribution networks *Applied Mathematical Modelling*, 36(4), 1703-1717.

Camm, J. D., Chorman, T. E., Dill, F. A., Evans, J. R., Sweeney, D. J., and Wegryn, G. W. (1997). Blending OR/MS, judgment, and GIS: Restructuring P&G's supply chain. *Interfaces*, 27(1), 128-142.

Canel, C., and Khumawala, B. M. (1997). Multi-period international facilities location: An algorithm and application. *International Journal of Production Research*, 35(7), 1891-1910.

Dasci, A., & Verter, V., (2001). A continuous model for production-distribution system design. *European Journal of Operational Research*, 129(2), 287-298.

Devanagan.LK, An integrated Production, Inventory, Warehouse Location AND distribution Model July-December 2016, p 1-9.

Dror, M., and Ball M. (1987). Inventory routing: Reduction from an annual to a short period. *Naval Research Logistics*, 34, 891-905.

Erengüç, S. S., Simpson, N. C., and Vakharia, A. J. (1999). Integrated production/distribution planning in supply chains: An invited review. *European Journal of Operational Research*, 115(2), 219-236.

Kumanan, S., Venkatesan, S. P., and Kumar, J. P., (2007). Optimisation of supply chain logistics network using random search techniques. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 3(2), 252-266.

Lei, L., Liu, S, Ruszczyński, A, and Park, S., (2006). On the integrated production, inventory, and distribution routing problem. *IIE Transactions*, 38(11), 955-970.

Lodree, E., Jang, W., and Klein, C. M. (2004). Minimizing response time in a two-stage supply chain system with variable lead time and stochastic demand. *International Journal of Production Research*, 42(11), 2263-2278.

Safra, I. 2009. Mémoire « Vers une approche intégrée de gestion de planification de la production et de la distribution », description et synthèse bibliographique.

Yu, V. F., Normasari, N. M. E, and Luong, H. T. (2015). Integrated location-production-distribution planning in a multiproducts supply chain network design model. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, 1-13.