

EQUILIBRAGE DES POSTES LOGISTIQUES D'APPROVISIONNEMENT BORD DE LIGNE D'UNE USINE TERMINALE AUTOMOBILE

S. THOMAS, O. GOURGUECHON

PSA Peugeot Citroën
45 rue Jean Pierre Timbaud – Bat C33
78307 POISSY cedex
sylvain.thomas1@mpsa.com,
olivier.gourguechon@mpsa.com

Y. FREIN, O. BRIANT

G-SCOP, INP Grenoble, UJF, CNRS
46 avenue Félix Viallet
38000 GRENOBLE
yannick.frein@g-scop.inpg.fr,
olivier.briant@g-scop.inpg.fr

RESUME : *Cet article s'intéresse au problème de l'équilibrage des postes logistiques d'approvisionnement Bord De Ligne d'une usine terminale automobile. L'équilibrage constitue aujourd'hui un axe majeur dans l'amélioration de l'engagement des opérateurs logistiques. Nous présentons ici des outils d'aide à la décision qui ont pour but d'aider l'équilibreur dans sa tâche. Nous proposons aussi un moteur d'optimisation qui est capable de calculer automatiquement un équilibrage optimisé selon les indicateurs que nous avons mis en place.*

MOTS-CLES : *Modélisation, simulation, optimisation, opérateur logistique, outil d'aide à la décision*

1. INTRODUCTION

L'assemblage des constituants sur la voiture est la principale activité d'une usine terminale automobile. Une des politiques actuelles du groupe PSA Peugeot Citroën tend à concentrer son activité sur cet assemblage. Des travaux importants ont déjà été menés concernant l'équilibrage du flux principal d'assemblage (Scholl et al., 2006 ; Lesert, 2006) ; d'autres ont abordé l'approvisionnement des usines terminales (Villeminot, 2004). Notre périmètre d'étude est novateur car il est à l'interface de tous ces travaux. En effet, cette activité d'assemblage génère tout un ensemble de tâches logistiques indispensables au bon fonctionnement d'une usine terminale. Elle nécessite une gestion performante des flux internes d'approvisionnements et notamment l'acheminement des pièces des zones de stockage en usine vers le bord de ligne où elles seront montées sur les véhicules.

Deux principaux types d'opérateurs logistiques se distinguent : les distributeurs par Car à Fourche, et les distributeurs de Petits Colis par « petit train » (ensemble tracteur – remorques). La Distribution Car à Fourche consiste à approvisionner de gros bacs (Unité de Conditionnement) un par un avec un « fenwick » ; l'opérateur fait alors des allers-retours entre le magasin et la ligne de montage. La Distribution par Base Roulante (petit train) effectue périodiquement un ensemble de circuits de distribution déterminés à l'avance lors de l'équilibrage, avec des arrêts à plusieurs gares pour déposer de petits colis dans des stockeurs dynamiques situés au bord de ligne de production.

Cet article s'inscrit dans une thèse CIFRE dont le premier objectif est d'évaluer les éléments qui influent sur

l'activité d'un opérateur logistique, pour ainsi mieux les intégrer dans l'équilibrage logistique en termes de moyens humains et donc de la charge affectée à chacun d'eux. Le second est de proposer des outils d'aide à la décision pour la détermination et le pilotage des effectifs logistiques.

Le but de cet article est de présenter les outils d'aide à la décision que nous avons mis au point pour équilibrer les postes logistiques d'approvisionnement Bord de Ligne d'une usine terminale automobile. Après avoir exposé la problématique dans laquelle s'inscrit notre étude, nous détaillerons le travail effectué en abordant successivement les différents outils et indicateurs que nous proposons.

2. PROBLEMATIQUE

2.1. Problématique générale

Une usine terminale automobile est composée de trois ateliers : un atelier ferrage où la carrosserie est formée, l'atelier peinture où la voiture subit des traitements anti rouille puis est peinte, et enfin l'atelier montage, où les différents constituants de la voiture (roues, sièges, tableau de bord, ...) sont assemblés. L'atelier montage est l'atelier qui concentre la plus grande partie des opérateurs logistiques d'approvisionnement.

L'article se focalise sur l'atelier montage et plus précisément sur la partie de distribution en Bord de Ligne – entre les magasins et la ligne de montage – tous moyens de distribution confondus (distribution par Car à Fourche et par Base Roulante).

L'étude de terrain a montré que l'activité d'un opérateur logistique pouvait suivre de fortes variations au cours de la journée. Nous avons dénombré trois explications de ces variations :

- Les variations dues aux aléas extérieurs (rupture d'approvisionnement des fournisseurs, arrêt de la ligne de montage, ...),
- Les variations dues au poste en lui-même (accumulation de demandes de différentes références dans de courtes périodes, ...),
- Les variations dues aux interactions inter-opérateurs (ralentissements, congestions des allées, ...).

Du fait de l'existence de ces variations, les équilibres logistiques ont remonté qu'ils étaient obligés de « sur – provisionner » ces variations et par conséquent de ne pas charger les postes aux quotas recommandés dans les procédures, ceci afin d'assurer un fonctionnement en toute circonstance et sans rupture¹. Certains postes ne sont ainsi chargés qu'à 50% de leur capacité.

Cet article reporte les résultats obtenus dans le cadre d'une étude sur l'équilibrage des postes logistiques. L'enjeu présent est de comprendre son fonctionnement, les éléments pris en compte actuellement et ceux que l'on souhaite prendre en compte, pour pouvoir les maîtriser et proposer un équilibrage optimisé qui permet d'assurer une charge suivant les recommandations des procédures (85% de la capacité initiale).

2.2. Problématique détaillée suite à une étude de terrain

Une première estimation de l'effectif humain logistique nécessaire est déduite du nombre de véhicules à produire et de leurs options après un éclatement de la nomenclature² (pour connaître les quantités de références à monter) ; ceci est un nombre d'opérateurs logistiques minimum et correspond à la première étape d'un équilibrage : le dimensionnement du besoin en effectif humain. Ce nombre peut être augmenté si, dans l'étape suivante d'équilibrage, aucune solution viable n'est trouvée, ce qui est très souvent le cas sur le terrain.

L'équilibrage des opérateurs logistiques consiste en une répartition de ces références parmi les moyens humains définis dans l'étape précédente. L'affectation des références se fait en fonction du temps d'approvisionnement des références en questions, de leur localisation géographique dans l'atelier montage, et surtout du temps de

travail effectif de l'opérateur. Ce dernier se décompose de la manière suivante :

- une partie due aux aléas extérieurs, modélisée par une quantité fixe (arrêts de fabrication, maintenance, ...),
- une partie variable dédiée à la distribution proprement dite,
- une partie due aux congestions des allées des ateliers, modélisée par une quantité fixe (blocages).

Les aléas et les congestions sont actuellement modélisés selon les règles du constructeur par un pourcentage fixe du temps de travail effectif. Ce pourcentage a été déterminé de manière arbitraire et sans étude préalable. Le temps de distribution attribué lors de l'équilibrage est la somme de tous les temps d'approvisionnement des références affectées à un opérateur. C'est un calcul totalement théorique, sans aucune vérification de faisabilité.

Notre problématique d'amélioration de l'engagement et de l'équilibrage des postes logistiques doit corriger tous ces aspects non pris en compte actuellement. Elle doit proposer les outils et indicateurs qui permettront d'arriver à un équilibrage réalisable et robuste.

3. RESULTATS OBTENUS

3.1. Etude temporelle de l'activité d'un opérateur logistique

A l'instar des travaux menés pour modéliser l'activité d'un opérateur sur une ligne de montage [Lesert, 2006], nous nous penchons sur la modélisation de l'activité d'un opérateur logistique, très peu présente voire inexistante dans la littérature.

Le but de cette étude est de modéliser l'activité d'un opérateur logistique pris indépendamment des autres, et ce de manière temporelle.

Nous présentons ici seulement les résultats de l'étude concernant la Distribution par Car à Fourche. Une étude similaire a été réalisée pour la Distribution par Base Roulante. Les résultats de cette dernière étant moins significatifs, nous préférons présenter les résultats de l'étude temporelle de l'activité d'un opérateur logistique en Car à Fourche.

Dans un premier temps, nous avons créé un simulateur de l'activité d'un opérateur logistique. Ce simulateur a fait l'objet d'un article lors de la Conférence Internationale de Génie Industriel 2007 de Trois-Rivières au Canada (Thomas et al, 2007). Cet outil permet de simuler l'activité restante à faire de l'opérateur logistique à tout instant t de sa période de travail, et de calculer les indicateurs de charge et de ruptures qui en découlent. Grâce à ces indicateurs, l'équilibreur logistique chargé de l'équilibrage peut déterminer si le poste qu'il construit est tenable en fonction d'une liste de

¹ Une rupture survient si la ligne d'assemblage est obligée de s'arrêter par manque de pièces en Bord de Ligne.

² L'effectif humain est le résultat de la division de la somme de tous les temps de distribution de toutes les références à approvisionner par le temps de travail moyen cible d'un opérateur.

références donnée en entrée. Le principe du simulateur est de calculer l'activité restante à faire d'un opérateur logistique à chaque instant t selon un calendrier des demandes de réapprovisionnement déterministe calculé à l'avance. L'activité d'un opérateur logistique augmente du temps de livraison de la référence à chaque nouvelle demande de réapprovisionnement ; et elle diminue linéairement au cours du temps (nous supposons ici que l'opérateur logistique travaille toujours à la même allure). Le principe du simulateur peut se représenter par la formule suivante :

$$f(t) = \sum_{i \in S(t)} tpsDist(i) - [t - D(t)] \quad (1)$$

où :

- $tpsDist(i)$ est le temps de distribution de la référence i
- $S(t)$ est l'ensemble des tâches demandées et non terminées avant t
- $D(t)$ est la date de demande de la dernière tâche avant t et non terminée

Le calendrier de gestion des demandes de réapprovisionnement d'un opérateur logistique est généré selon une consommation lissée sur une journée. Dans cette étude, nous considérons deux gestions possibles des demandes. Ces gestions sont extrêmes l'une de l'autre. Lorsqu'une file d'attente des demandes de réapprovisionnements se crée, elle peut être gérée par l'un ou l'autre de ces deux systèmes, sachant que le comportement des opérateurs sur le terrain est un « mixte » de ces deux gestions. La première modélisation suit une gestion FIFO (First In First Out) des demandes ; elle correspond à un opérateur logistique débutant qui traite ses demandes au fil de l'eau. La seconde utilise une gestion « optimisée » des demandes. Dans ce cas, nous traitons les demandes selon une gestion EDD (Earliest Due Date) (Cheng T.C.E., 1984) afin de simuler le fait que l'opérateur, fort de son expérience, desservira toujours en premier la référence la plus urgente pour minimiser le nombre de ruptures.

Deux indicateurs ont découlé de cette étude. Ces deux indicateurs ont le même but : traduire la difficulté de tenue du poste, difficulté qu'il était jusqu'alors très dure, voire impossible, à estimer. Dans cette étude, un poste est considéré comme tenable si son nombre de ruptures moyen par tournée³ ne dépasse pas 1 rupture sur 100 tournées simulées. La méthode de gestion utilisée pour les résultats suivants est la gestion FIFO. La méthode de gestion par EDD sera utilisée dans la partie Optimisation.

³ Une tournée est le terme employé sur le terrain pour définir une journée de travail d'un opérateur logistique. Cela correspond à la somme du temps travaillé et des pauses. Chez PSA Peugeot Citroën, la durée d'une tournée est de 441 minutes.

Le premier indicateur est issu de la simulation en elle-même. Il s'agit d'un indicateur de « marge d'augmentation ». Le principe est d'augmenter la Consommation Moyenne Journalière (CMJ) de toutes les références du poste en même temps. La simulation évalue l'impact d'une augmentation de la CMJ sur la tenue du poste. L'augmentation de la CMJ continue jusqu'à obtenir un poste non tenable. La marge d'augmentation est la différence entre la charge maximale acceptable telle que le poste soit encore tenable après augmentation de la CMJ et la charge nominale⁴.

Le tableau ci-dessous récapitule les résultats de l'indicateur « marge d'augmentation » (appelé simplement « Marge » dans le tableau ci-après) pour les postes du site de production d'Aulnay pour le mois de mai 2006.

La première estimation du nombre d'opérateur logistique propose un nombre minimum d'opérateurs logistiques de 20. L'équilibreur, n'ayant pas trouvé de solutions d'équilibrage viables, a augmenté ici le nombre d'opérateurs logistiques nécessaires à 25 postes.

N° poste	Charge	Charge Max	Marge
1	70,43	94,73	24,30
2	50,33	56,54	6,21
3	71,16	95,46	24,30
4	61,22	91,09	29,87
5	69,37	93,15	23,78
6	57,28	99,46	42,17
7	67,23	69,00	1,77
8	60,53	89,88	29,36
9	48,29	96,88	48,59
10	79,00	85,28	6,28
11	61,24	81,52	20,28
12	48,60	85,06	36,46
13	55,01	64,62	9,61
14	52,69	83,38	30,68
15	42,91	80,95	38,04
16	39,50	97,54	58,04
17	96,71	96,71	0,00
18	69,97	90,18	20,21
19	85,61	85,61	0,00
20	81,33	92,35	11,02
21	69,93	93,77	23,84
22	98,58	98,58	0,00
23	75,94	90,02	14,09
24	80,88	91,68	10,80
25	76,46	76,46	0,00

Tableau 1. Tableau récapitulatif des marges d'augmentation

La marge d'augmentation est un indicateur intéressant car il permet non seulement de déterminer les postes sous chargés, mais aussi de connaître de combien ces postes peuvent être augmentés.

⁴ La charge nominale est la charge du poste tel qu'il a été créé au départ, i.e. sans augmentation de la CMJ.

Le second est un indicateur calculé *a priori*, avant simulation, qui se base sur la nature propre du poste, et plus précisément sur la nature des références affectées au poste (quantité par unité de conditionnement, consommation). Il se nomme IDTP pour Indicateur de Difficulté de Tenue de Poste.

Une étude des postes d'Aulnay pour l'équilibrage du mois de mai 2006 a montré qu'il existait deux raisons majeures pour qu'un poste soit en difficulté. La première est évidente ; il s'agit d'une trop grande charge. La seconde cause est l'existence de références critiques. Une référence est dite critique lorsqu'à elle seule, elle occupe plus de 30% de la charge de travail de l'opérateur logistique. Nous présentons dans la figure ci-dessous les résultats de l'étude d'un poste logistique typique du poste ayant des difficultés sur le terrain. Ce poste est le poste numéro 2 du tableau précédent. C'est un poste très peu chargé (50 % de son temps de travail), et il ne peut que très peu être sur chargé.

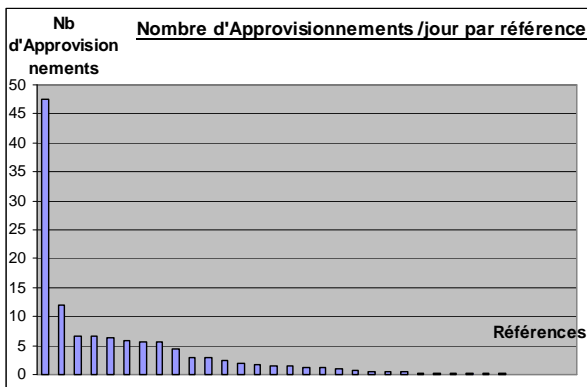


Figure 1. Etude d'un poste peu chargé mais ayant des difficultés sur le terrain (poste n°2 d'Aulnay)

Le poste n°2 présente la caractéristique principale des postes à « problèmes », à savoir la présence d'au moins une référence critique (représentée sur l'histogramme par la première barre verticale). Nous observons ici qu'il existe une référence dont le nombre d'approvisionnements par jour est supérieur à 45. Sachant que le temps moyen d'un approvisionnement est de l'ordre de 6 minutes et qu'un opérateur logistique travaille 420 minutes, nous montrons que cette référence en question couvre plus de 64% du temps de travail de l'opérateur n°2. La référence en question est bien une référence critique.

L'indicateur IDTP a pour but de tenir compte de la présence de références critiques pour évaluer *a priori* la difficulté de tenue d'un poste logistique. Il se définit par la formule suivante.

$$IDTP = A * charge^2 \quad (2)$$

où A est égal au nombre d'approvisionnements par jour de la référence la plus demandée du poste.

Cet indicateur a pour but d'aiguiller l'équilibreur dans la construction du poste, lors de l'affectation des références au poste. L'objectif de cet indicateur est de répartir équitablement entre l'ensemble des différents postes logistiques les références considérées comme critiques.

Pour vérifier la validité de cet indicateur, nous avons effectué une simulation de tous les postes logistiques issus de l'équilibrage de mai 2006 du site de production d'Aulnay. Nous avons calculé la marge d'augmentation de chaque poste, quand cela est possible (voir Tableau 1. ci-dessus). Nous avons trié les postes par marge d'augmentation croissante, afin de correspondre à un tri des postes selon une difficulté de tenue du poste décroissante de gauche à droite. Pour les postes 22, 25, 19 et 17 ayant une marge d'augmentation nulle, autrement dit les postes créant des ruptures dans leur état d'origine, nous les trions par nombre de ruptures décroissant. Sur le même graphique, nous avons fait apparaître notre indicateur IDTP.

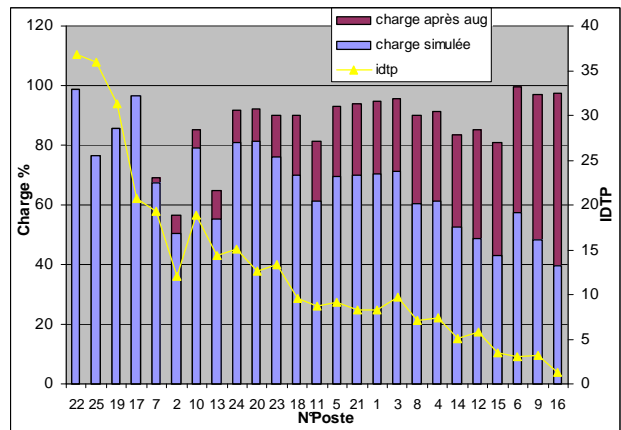


Figure 2. Variations de l'indicateur IDTP en fonction d'un tri des postes logistiques selon une marge d'augmentation croissante

Un indicateur parfait montrerait une courbe totalement décroissante sur l'histogramme des postes triés par difficulté de tenue décroissante. Nous pouvons observer que ce n'est pas réellement le cas, notamment pour les postes n°2 et 10. Une étude approfondie a montré que ces deux postes sont très semblables au niveau de la composition des références qui leur sont affectées (présence de références critiques) et de leur marge d'augmentation. Mais ils diffèrent par leur charge nominale, et par conséquent leur indicateur est impacté. Hormis cette variation, l'indicateur IDTP reste globalement décroissant. Nous considérons donc qu'il reflète correctement la réalité du terrain.

Nous avons maintenant à disposition deux indicateurs qui expriment la difficulté de tenir un poste logistique : un indicateur avant simulation qui permet d'épauler

l'équilibreur logistique lors de la réalisation de l'équilibrage, et un indicateur post simulation qui vérifie la faisabilité de l'équilibrage.

L'objectif souhaité est d'utiliser l'indicateur IDTP comme un critère de la fonction objectif de l'optimisation d'un équilibrage logistique.

3.2. Optimisation d'un équilibrage logistique

3.2.1. Objectifs

Le but de l'optimisation est de fournir un outil d'aide à la décision capable de créer un équilibrage logistique optimisé. Un équilibrage optimisé correspond à la meilleure répartition des références à approvisionner entre un nombre d'opérateurs logistiques minimum et suffisant à déterminer. Il s'agit de créer des postes homogènes, viables et robustes par exemple à des augmentations de demandes de réapprovisionnement.

Le moteur d'optimisation doit intégrer les différents points non pris en compte actuellement lors d'un équilibrage logistique, à savoir la vérification qu'un poste est réalisable, le niveau de difficulté de tenue du poste. L'optimisation va ainsi utiliser des contraintes classiques de charges moyennes et maximales, de nombre de ruptures minimal (en l'occurrence nous acceptons une rupture sur 100 tournées), mais aussi et surtout intégrer les nouveaux indicateurs que nous proposons dans sa fonction objectif.

L'optimisation fait appel à plusieurs problèmes scientifiques très connus : les problèmes d'équilibrage et de répartition de références, les problèmes de régionalisation (ou attribution de références proches les unes des autres géographiquement à un même poste). L'originalité de notre étude réside dans son application à un équilibrage logistique automobile, avec les contraintes spécifiques qui en découlent (mode de fonctionnement des opérateurs, réseau physique spécifique – allées rectilignes –, contrainte de délai d'approvisionnement, contrainte physique des conditionnements, ...).

Enfin, le moteur sera couplé avec le simulateur que nous avons développé. Il devra être capable de l'appeler à n'importe quel moment de l'étape d'optimisation, soit pour évaluer les indicateurs, soit pour vérifier la proposition d'équilibrage qu'il vient de faire. Les appels du simulateur permettront entre autre de calculer les indicateurs IDTP des postes optimisés, mais aussi et surtout de vérifier leur faisabilité et leur tenue (nombre de ruptures, marge).

3.2.2. Proposition d'un nouvel équilibrage

Des premiers tests d'optimisation ont été effectués. Le moteur d'optimisation implémenté jusqu'à maintenant n'utilise dans sa fonction objectif qu'un seul indicateur, l'indicateur IDTP de difficulté de tenue de poste issu de

l'étude sur l'activité d'un opérateur logistique pris indépendamment des autres opérateurs. Le but est de minimiser l'indicateur IDTP maximal et moyen tous postes confondus selon une logique que nous précisons par la suite. Nous conservons la contrainte de charge maximale qu'un poste logistique ne doit pas dépasser. Le programme d'optimisation utilise des données réelles en entrée. Les tests ont été réalisés avec les références à approvisionner d'Aulnay.

Le principe de l'optimisation consiste dans un premier temps à déterminer le nombre d'opérateurs logistiques théorique minimum. Comme nous l'avons vu dans la partie 3.1., ceci s'effectue grâce à un calcul simple où le nombre d'approvisionnement par jour de chaque référence est calculé. A partir de là, le temps nécessaire et total de distribution de toutes les références est déduit. Le nombre théorique d'opérateurs est déterminé par la division de ce temps total de distribution par le temps de travail cible moyen d'un opérateur logistique.

La deuxième étape réside dans une première attribution des références aux postes logistiques. Cette première répartition est faite de manière aléatoire, avec comme seule contrainte celle de charge maximale.

Le troisième temps correspond à la partie d'optimisation proprement dite. L'algorithme actuellement utilisé est une simple « descente ». Nous effectuons des transferts de références de poste à poste en ne conservant que les transferts améliorant l'indicateur IDTP moyen s'ils ne dégradent pas l'IDTP maximal tous postes confondus, et respectant la contrainte de la charge maximale. Le code de l'optimisation est le suivant.

Nous rappelons que l'indicateur IDTP du poste i se définit de la manière suivante si S_i est l'ensemble des références affectées au poste i .

\forall partition $S_1 \cup S_2 \cup \dots \cup S_n$ de S (ensemble de toutes les références à livrer)

$$IDTP(S_i) = A(S_i) \times Ch(S_i)^2 \quad (3)$$

où :

$$A(S_i) = \max_{r \in S_i} nbAppro(r) \quad (4)$$

$$Charge(S_i) = Ch(S_i) = \left(\sum_{r \in S_i} TpsDistribution(r) + Temps\ des\ opérations\ forfaitaires^5 \right) / Durée\ d'une\ tournée \quad (5)$$

⁵ Les opérations forfaitaires sont des opérations logistiques obligatoires à chaque tournée, comme le changement de la batterie de l'engin ou la visite des éléments de sécurité.

Remarque : Au vu de cette formule, si nous enlevons une référence au poste i , alors l'indicateur IDTP du poste i en question diminue, et si nous ajoutons une référence au poste j , alors son IDTP augmente.

Code de l'optimisation :

Répéter

Pour tout poste i , tout poste j

et toute référence r de i (c'est-à-dire $r \in S_i$)

Si $(IDTP(S_j \cup \{r\}) < \max_{k \in \{1,n\}} IDTP(S_k))$ et

$Ch(S_j \cup \{r\}) < Ch_Max$ et

$IDTP(S_i \setminus \{r\}) + IDTP(S_j \cup \{r\}) < IDTP(S_i) + IDTP(S_j)$

Alors $S_i \leftarrow S_i \setminus \{r\}$

$S_j \leftarrow S_j \cup \{r\}$

Fin Si

Fin Pour

Jusqu'à ce que plus aucun transfert ne soit effectué.

Une fois l'optimisation terminée, nous simulons les postes que nous avons obtenus pour vérifier leur viabilité. La règle de gestion des demandes de réapprovisionnements suit toujours un modèle FIFO.

L'histogramme ci-dessous affiche les résultats de la simulation des postes logistiques obtenus après optimisation. Les postes sont triés par marge d'augmentation croissante.

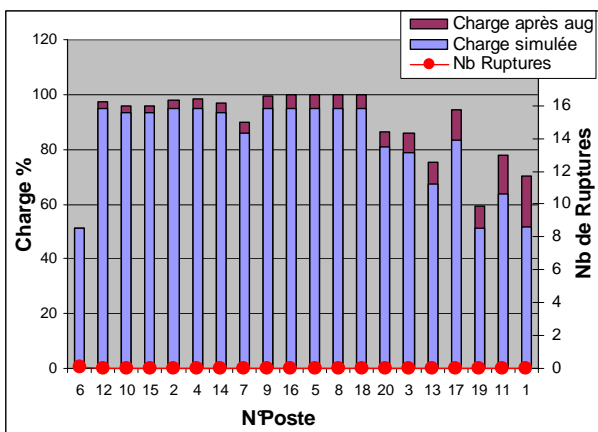


Figure 3. Résultats de la simulation après optimisation

Dans le cas d'Aulnay, nous nous apercevons qu'il est possible de n'engager que les 20 opérateurs logistiques strictement nécessaires théoriquement, au lieu des 25 actuels, et de réussir à livrer l'ensemble des pièces en bord de ligne de montage dans les temps sans créer de

ruptures. Nous pouvons remarquer par ailleurs que la quasi-totalité des postes peuvent accepter une légère surcharge bien qu'ils soient chargés à leur capacité maximale autorisée de 95% (cf. postes 12 à 18 sur le graphique). D'autre part, nous observons aussi que quelques postes pourraient encore être optimisés vu que certains d'entre eux ont des marges d'augmentation supérieures à 10 voire 20% (postes 20 à 1 sur le graphique). Une question en découle naturellement : « Y a-t-il possibilité de réduire de nouveau le nombre d'opérateurs logistiques engagés ? ».

Il faut aussi signaler que le poste 6, bien que très peu chargé, ne le peut être davantage. Ceci est dû au fait qu'une référence très critique lui a été affectée. Cette référence a une période de réapprovisionnement⁶ tellement petite que l'opérateur logistique éprouve des difficultés à effectuer ses opérations forfaitaires (type changement de la batterie) entre deux demandes de cette référence critique. Augmenter la consommation (autrement dit diminuer la période de réapprovisionnement) ou ajouter une référence à livrer rend donc ce poste intenable, malgré une charge de travail faible.

D'autre part, l'optimisation ayant été réalisée à partir de l'indicateur IDTP seul, cela confirme la pertinence et la robustesse de celui-ci avec une gestion FIFO des demandes de réapprovisionnement.

Une limite à ce résultat doit cependant être soulevée pour être rigoureux. A ce jour, le problème de régionalisation n'a pas été pris en compte lors de l'affectation des références aux postes logistiques. Cela signifie que lors de nos transferts de références d'un poste à un autre, nous n'avons pas vérifié la proximité des lieux de livraisons des références affectées à un même opérateur. Ce point nécessite d'être amélioré si nous voulons que notre équilibrage soit réellement envisageable sur le terrain.

Une autre amélioration sera apportée au moteur d'optimisation. Elle consistera à « upgrader » l'algorithme de résolution, qui est actuellement un simple algorithme de « descente ». Des algorithmes type recuit simulé ont d'ores et déjà été évoqués (Hao et al, 1999).

3.2.3 Influence des politiques de gestion des références en attente

Un second axe de recherche d'optimisation a été exploré. Jusqu'à présent, les indicateurs utilisés dans l'optimisation concernent une gestion FIFO des demandes de réapprovisionnements. Or cette gestion n'est pas une gestion optimisée, contrairement à la

⁶ La période de réapprovisionnement est le temps entre deux demandes d'une même référence.

gestion EDD (Cheng T.C.E., 1984). Nous avons effectué des tests pour connaître l'impact d'une gestion EDD sur l'activité d'un opérateur logistique et sur un équilibrage. Il s'est avéré qu'une telle gestion avait des résultats inattendus et très intéressants.

L'histogramme en figure 4. ci-dessous présente les résultats de la simulation des postes logistiques d'Aulnay montage avec la répartition des références d'origine non optimisées et selon une gestion EDD du traitement des demandes d'approvisionnement. Les postes sont toujours triés par marge d'augmentation croissante.

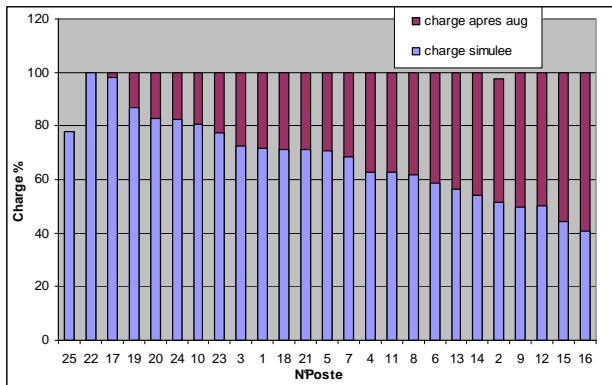


Figure 4. Résultat d'une simulation en gestion EDD

Nous n'observons ici qu'un seul poste (poste 25) créant encore des ruptures (car sa marge d'augmentation est nulle), contrairement à la gestion FIFO (voir Figure 1. dans l'étude précédente) dans laquelle nous avions quatre postes en rupture. Il faut toutefois préciser que ce poste a non seulement un taux de ruptures très faible (1 rupture sur 30 tournées), mais aussi que le temps moyen des ruptures est inférieur à une minute. Cela signifie que la référence créant une rupture a été livrée en bord de ligne en moyenne moins de une minute après avoir été déclarée en rupture.

Grâce à une simulation de l'activité d'un poste logistique et du calcul de la marge d'augmentation du poste, nous voyons que, sous couvert d'une gestion EDD, tous les postes logistiques, à l'exception d'un seul, peuvent être augmentés au maximum de leur capacité. Les conséquences de cette simulation sont qu'avec une bonne gestion des demandes de réapprovisionnements non seulement tous les postes sont tenables, mais surtout cela signifie que nous pouvons supprimer bon nombre de postes logistiques qui sont actuellement clairement sous chargés (cf. les marges d'augmentations très importantes).

L'indicateur IDTP a été testé pour étudier si sa pertinence était toujours d'actualité avec une telle gestion optimisée. Nous avons simulé un calendrier de demandes pour les 25 postes d'origine d'Aulnay et avec une gestion EDD pour gérer la liste d'attente. De la même manière que pour l'étude avec une gestion FIFO, nous avons trié les postes par marge d'augmentation

croissante, afin de correspondre à un tri des postes selon une difficulté de tenue du poste décroissante de gauche à droite. Puis, sur le même graphique, nous avons fait apparaître notre indicateur IDTP. Nous pouvons observer dans la figure ci-dessous que notre indicateur IDTP est moins pertinent et robuste avec cette gestion EDD de la file d'attente des demandes de réapprovisionnement.

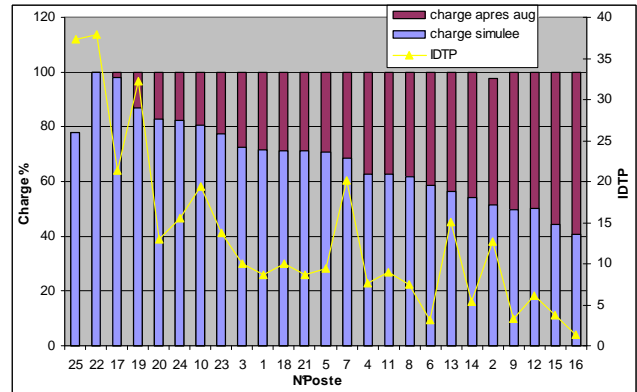


Figure 5. Variation de l'indicateur IDTP en gestion EDD

L'enjeu actuel est donc de trouver un indicateur de difficulté de tenue de poste qui soit pertinent pour une gestion EDD. Ainsi l'utilisation d'un tel indicateur suppose une éventuelle chance d'obtenir des résultats d'optimisation encore plus robustes que ceux obtenus jusqu'à présent, résultats qui se basaient uniquement sur un indicateur robuste seulement en gestion FIFO. Ces résultats permettraient de réaliser un équilibrage plus lissé sur l'ensemble des postes logistiques, postes qui seront alors plus robustes aux aléas.

4. CONCLUSIONS & PERSPECTIVES

4.1. Conclusions

L'utilisation de la modélisation, simulation et optimisation pour la création d'outils d'aide à la décision est aujourd'hui de plus en plus appréciée et nécessaire.

Dans notre cas d'un équilibrage logistique, la création d'outils d'aide à la décision se devait de passer par des étapes de modélisation et simulation, puis d'optimisation. En effet, la vérification de la faisabilité d'un poste logistique, ou encore l'évaluation de la difficulté de tenue d'un poste, sont des indicateurs importants dans l'élaboration d'un équilibrage, et il était jusqu'à présent impossible de les déterminer. La simulation montre ici toute son utilité. Quant à l'optimisation, elle amène son expertise pour un problème d'équilibrage logistique qui doit prendre en compte une multitude de contraintes qu'il serait impossible de respecter sans aide informatique.

Nous amenons ici deux outils différents, une simulation et un moteur d'optimisation, qui vont aider l'équilibreur logistique dans ses choix opérationnels.

4.2. Perspectives

Le moteur d'optimisation doit être davantage développé. Les améliorations citées précédemment dans la partie 3.2.2. peuvent être ajoutées successivement au programme d'optimisation, à savoir la prise en compte de problème de régionalisation, l'optimisation selon un indicateur robuste en gestion EDD lorsque ce dernier sera mis en place, et bien sûr un algorithme de résolution plus performant.

Une dernière étude est en cours de réalisation. L'objectif de cette étude est de modéliser puis simuler de manière spatio – temporelle les déplacements des opérateurs logistiques (Car à Fourche et Bases Roulantes) dans les allées d'un atelier montage.

L'intérêt de la simulation réside dans l'évaluation spatio - temporelle des interactions inter opérateurs, soit les congestions (pour faire une analogie au trafic urbain, il s'agit des bouchons), les ralentissements, les blocages, qui surviennent dans les allées d'un atelier montage.

Nous modélisons l'atelier montage par graphe. Les allées de l'atelier correspondent aux arcs du graphe, et les différents lieux de livraisons aux nœuds du graphe.

Grâce à cette simulation, nous nous proposons d'évaluer deux indicateurs. Les indicateurs en question sont un indicateur de perte de temps de l'opérateur par journée de travail, et un indicateur de taux d'utilisation des allées.

Le but final est d'intégrer ces deux indicateurs en tant qu'informations supplémentaires dans le moteur d'optimisation. Par exemple, l'indicateur de la perte de temps peut être intégré comme une contrainte sur la charge maximale du poste, et l'indicateur du taux d'utilisation des allées peut servir à pondérer le temps de distribution de certaines références.

Enfin, d'un point de vue plus général et plus lointain, un projet de développement industriel peut être soulevé. Lors des différentes études, nous avons perçu de grandes possibilités d'améliorations. Un axe de poursuite d'étude serait l'accompagnement de l'opérateur logistique. En effet, nous présentons la gestion EDD comme la meilleure gestion de traitement des demandes de réapprovisionnements. Or, un opérateur logistique, aussi

doué soit-il, ne peut connaître l'ordre EDD optimum. Le projet serait d'accompagner la réalisation de l'équilibrage par la possible création d'une liaison entre nos outils de simulation et le distributeur logistique via un écran. L'ordre optimal de traitements des demandes pourrait ainsi être communiqué directement à l'opérateur logistique en atelier.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Cheng T. C. E., 1984, *Optimal Due-Date Determination and Sequencing of n Jobs on a Single Machine*, The Journal of the Operational Research Society, Vol. 35, No. 5 (May, 1984), pp. 433-437
- Emmerson J.A., Ladbroke J., 2003, *Modelling the internal delivery of materials to engine machining and assembly lines in Ford Motor Company using component based simulation*, (www.lanner.com)
- Hao J.K., Galinier P., Habib M., 1999, *Métaheuristiques pour l'optimisation combinatoire et l'affectation sous contraintes*, RIA Revue d'Intelligence Artificielle, Vol n°1999
- Hoogendoorn S.P., Bovy P.H.L., 2001, *State-of-the-art of Vehicular Traffic Flow Modelling*, Journal of Systems and Control Engineering (Special Issue on Road Traffic Modelling and Control), Vol. 215, No. 4, p. 283 – 304
- Kleijnen J.P.C., Sanchez S.M., Lucas, T.W., Cioppa, T.M., 2005, *A User's Guide to the Brave New World of Designing Simulation Experiments*, INFORMS Journal on Computing, Vol. 17, No. 3, pp. 263–289
- Lesert, A., 2006, *Sur l'évaluation de la flexibilité de l'atelier montage d'une usine terminale automobile*, Thèse de doctorat, INP Grenoble UJF CNRS, Grenoble, soutenue le 18/12/2006
- Miller H.J., Wu Y.-H., Hung M.-C., 1999, *GIS-based dynamic traffic congestion modeling to support time-critical logistics*. Proceedings of the 32nd Hawaii International Conference on System Sciences.
- Scholl, A, Becker C., 2006, *State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing*, European Journal of Operational Research 168 (2006) ,666-693
- Thomas S, Frein Y, Briant O, Massieu J.E., 2007, *Simulation de l'activité d'un opérateur logistique d'approvisionnement Bord de Ligne d'une usine terminale automobile*, CIGI 2007, Trois-Rivières, Canada
- Villeminot, A., 2004, *Contribution à la modélisation et à la simulation des flux logistiques d'une usine terminale automobile*, Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy, soutenue le 10/12/2004