

Sur le choix des contraintes d'espacement pour l'ordonnement des véhicules dans une usine terminale

Aymeric Lesert², Gülgün Alpan², Yannick Frein², Stéphane Noire¹

¹ PSA Peugeot Citroën, 45, rue Jean-Pierre Timbaud, 78307 Poissy Cedex, stephane.noire@mpsa.com

² GILCO, ENSGI-INPG, 46 Avenue Félix Viallet, 38031 Grenoble Cedex, yannick.frein@gilco.inpg.fr

RÉSUMÉ : Cet article s'intéresse au problème de l'ordonnement des véhicules sur une ligne d'assemblage automobile. Plus précisément, nous proposons un indicateur de pertinence capable d'évaluer la qualité du choix d'une option ou d'une combinaison d'options à espacer en fonction de la charge de travail des opérateurs. L'espacement des véhicules présentant des options difficiles à monter sur les véhicules permet aux opérateurs d'avoir une charge de travail lissée. Ce lissage leur offre la possibilité de travailler sereinement. Néanmoins, la diversité des véhicules à fabriquer est telle que déterminer l'option ou la combinaison d'options qui répond à cette problématique devient de plus en plus complexe. Par conséquent, l'introduction d'un indicateur de pertinence va permettre aux équilibriers d'évaluer précisément la qualité de leur choix.

MOTS-CLÉS : Car Sequencing Problem, Ordonnement, Indicateur de pertinence, Contrainte d'espacement

1. Introduction

La fabrication d'un véhicule sur une ligne de montage automobile nécessite des milliers d'opérations d'assemblage sur une ligne de montage. Une ligne de montage est découpée physiquement en pas de travail de taille identique matérialisant la distance entre l'avant de deux véhicules. Les véhicules avancent à vitesse constante et traversent chaque pas de travail en un temps cycle défini. Une ligne de montage est jalonnée de postes de travail, attachés à un pas de travail, occupés par un opérateur. L'équilibrage de cette ligne de montage consiste à affecter les milliers d'opérations aux postes de travail telle que la charge de travail sur chacun d'eux soit la plus homogène possible et telle que les temps de traitement des véhicules soient inférieurs au temps cycle. Mais, pour des raisons de coûts ou pour des contraintes d'installation, certains types de véhicules peuvent demander un temps de traitement supérieur au temps cycle ; nous dirons que ces types de véhicules provoquent un pic de charge sur le poste de travail considéré. Le passage d'un de ces types de véhicule sur le poste de travail oblige l'opérateur à accumuler un retard qu'il doit normalement récupérer sur les véhicules suivants. Néanmoins, l'opérateur peut se retrouver en difficulté lorsque ce retard devient suffisamment important pour l'obliger à faire appel à un opérateur polyvalent. Pour cette raison, traditionnellement dans la littérature et en pratique, ces véhicules doivent être espacés lors du séquençage des véhicules.

Cet espacement est réalisé à l'aide d'une contrainte d'espacement qui nécessite deux informations : un critère et un ratio N/P. Le critère représente une option ou une combinaison d'options caractérisant un ensemble de véhicules à espacer. Et, le ratio N/P représente le nombre de véhicules répondant au critère autorisés (N) dans une fenêtre glissante donnée (P) telle que l'opérateur ne doive pas faire appel à un opérateur polyvalent ou arrêter la ligne d'assemblage (Giard et al., 2006). Les travaux portant sur le problème de séquençage des véhicules sur une ligne d'assemblage à modèles mélangés (Comby, 1996), (Baratou, 1998) et (Joly, 2004) considèrent que les critères des contraintes d'espacement sont correctement définis. Face à la diversité croissante des véhicules à produire, il devient de plus en plus difficile d'évaluer la qualité du choix des critères à espacer. Or, la qualité du séquençage des véhicules dépend fortement de la qualité du choix des critères. Aujourd'hui, ce choix est laissé à la discrétion des équilibriers (responsables de l'équilibrage de la ligne de montage). Les méthodes et les outils utilisés pour les aider à faire ces choix ne sont pas abordés dans la

littérature. Dans la suite de cet article, nous allons étudier la façon de sélectionner les critères à appliquer au problème de séquençement des véhicules.

Dans cet article, pour définir efficacement des critères représentatifs des véhicules provoquant un pic de charge sur un ou plusieurs postes de travail d'une ligne d'assemblage, nous commencerons par étudier les relations possibles entre les véhicules répondant au critère d'une contrainte d'espacement et les véhicules provoquant un pic de charge sur un poste de travail. Ensuite, nous proposerons une hiérarchisation et un indicateur de pertinence de ces relations. L'ensemble des relations est alors représenté par une matrice colorée. Cette matrice permettra aux équilibreurs de choisir un jeu de critères de bonne qualité à appliquer lors du séquençement des véhicules après un équilibrage ou un rééquilibrage.

2. Relation entre un poste de travail et une contrainte d'espacement

En pratique et dans la littérature, la relation entre un poste et une contrainte se limite uniquement aux véhicules provoquant un pic de charge sur un poste de travail pour une option donnée.

Parello et al (1986), Yano et al (1991) et Kim (2001) supposent qu'une option est installée sur le véhicule à un poste de travail et qu'un opérateur a deux types de tâches à réaliser : une pour installer l'option et une autre quand il n'installe pas l'option.

Dans le cas où les tâches à réaliser par l'opérateur d'un poste de travail sont plus variées et nécessitent de nombreux temps de traitement, Giard et al. (2006) simplifient ces temps en se limitant à deux temps de traitement : un temps de traitement pour représenter les véhicules ayant un temps de traitement inférieur au temps cycle et un temps de traitement pour représenter ceux ayant un temps de traitement supérieur au temps cycle. Puis, ils considèrent qu'un critère représente une option ou une combinaison d'options caractérisant un ensemble de véhicules. Ils supposent ensuite que ce critère permet d'identifier tous les véhicules provoquant un pic de charge sur un poste de travail et uniquement ceux-là.

La définition de ces critères est toujours laissée à la discrétion des experts métiers, i.e. des équilibreurs. Les méthodes et les outils utilisés par les équilibreurs pour obtenir ces critères ne sont jamais abordés. Dans la suite, nous exprimons la relation entre les critères d'une contrainte et la charge de travail d'un opérateur sur un poste. Cette représentation nous permet d'identifier des différents niveaux de relations qui existent entre une contrainte et un poste de travail. Enfin, à partir de ces relations, nous définissons un indicateur de pertinence qui aide à évaluer la capacité du critère d'une contrainte à exprimer les véhicules qui devront être espacés.

2.1. Représentation de la charge de travail d'un opérateur

Pour un poste de travail, les véhicules du programme de production sont classés par ordre croissant de temps de traitement, regroupés par bloc de même temps et représentés graphiquement sous forme d'un graphe en barre (Figure 1). Cette représentation est très largement utilisée dans les systèmes d'information du groupe PSA Peugeot Citroën.

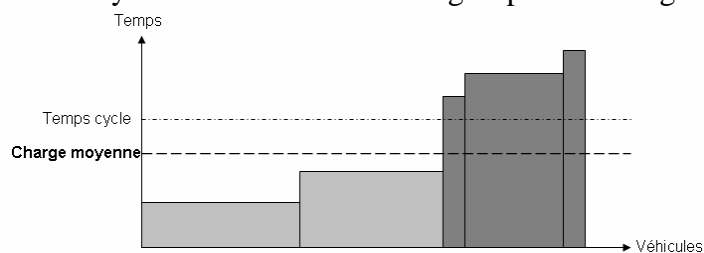


Figure 1. Représentation de la charge de travail d'un opérateur sur un poste

La figure 1 comprend 5 temps de traitement différents sur ce poste, deux inférieurs au temps cycle (en gris clair) et 3 supérieurs au temps cycle (en gris foncé). Nous rappelons que le choix d'avoir des temps supérieurs au temps cycle a été mûrement réfléchi et correspond à l'optimisation d'un coût de fabrication. Il est à noter que seuls les véhicules provoquant un pic de charge seront problématiques pour les opérateurs. En l'absence d'aléas de production dus à une panne d'un outillage ou à l'absence d'une pièce à monter, les véhicules n'ayant pas de pics de charge sont des véhicules qui permettent à l'opérateur de récupérer toute ou partie du retard accumulé.

2.2. Les différentes relations

La caractérisation d'une relation entre un poste de travail et une contrainte d'espacement s'appuie sur la relation qui existe entre deux sous-ensembles de véhicules d'un programme de production. Le premier ensemble contient les véhicules répondant au critère de la contrainte d'espacement et le deuxième, les véhicules provoquant un pic de charge sur le poste de travail.

Considérons :

$T_{i,v}$, temps de traitement du véhicule v sur le poste de travail i ,

V , l'ensemble des véhicules décrits dans un programme de production,

$V_{c_k} = \{v \in V \mid v \text{ répond au critère de la contrainte d'espacement } k\}$

$V_{p_i} = \{v \in V \mid T_{i,v} > T_{cycle}\}$, ensemble des véhicules provoquant un pic de charge sur le poste de travail i .

Pour définir une relation entre un poste de travail et une contrainte d'espacement, nous devons avoir un poste de travail avec des pics de charge ($V_{p_i} \neq \emptyset$) et un critère d'une contrainte d'espacement représentant au moins un véhicule à produire ($V_{c_k} \neq \emptyset$). En effet, un poste de travail qui n'a pas de véhicule provoquant un pic de charge ($V_{p_i} = \emptyset$) est un poste de travail qui accepte n'importe quelle séquence de véhicules sans avoir d'opérateurs en difficulté. Le critère d'une contrainte d'espacement qui ne caractérise pas un ensemble de véhicules ($V_{c_k} = \emptyset$) ne contraint pas le séquençement des véhicules puisqu'il n'y a pas de véhicules à espacer.

Par conséquent, à partir de deux sous-ensembles non vides, V_{c_k} et V_{p_i} , et de leurs interactions, la relation entre un poste de travail et une contrainte d'espacement se décline selon la grille d'évaluation décrite par le tableau 1, que nous allons expliciter par la suite.

Condition	Relation
$V_{c_k} = V_{p_i}$	Poste contraint par une contrainte
$V_{c_k} \cap V_{p_i} = V_{p_i}$ et $V_{c_k} - V_{p_i} \neq \emptyset$	Poste sur contraint par une contrainte
$V_{p_i} \cap V_{c_k} = V_{c_k}$ et $V_{p_i} - V_{c_k} \neq \emptyset$	Poste sous contraint par une contrainte
$V_{c_k} \cap V_{p_i} \neq \emptyset$, $V_{p_i} \cap V_{c_k} \neq V_{c_k}$ et $V_{c_k} \cap V_{p_i} \neq V_{p_i}$	Poste impacté par une contrainte
$V_{c_k} \cap V_{p_i} = \emptyset$	Poste non impacté par une contrainte

Tableau 1. Evaluation de la relation d'un poste de travail et d'une contrainte d'espacement

Nous pouvons représenter chacune des relations avec les figures de 2 à 6. Le graphique en barre représente la charge de travail d'un opérateur sur un poste à deux temps de traitement¹ : les véhicules ne provoquant pas de pic de charge (en gris clair) et les véhicules provoquant un

¹ Cette hypothèse facilite l'illustration de notre indicateur de pertinence. Mais, en pratique, chacun des deux sous-ensembles est un regroupement de plusieurs sous-ensembles de véhicules ayant les mêmes temps de traitement.

pic de charge (en gris foncé). Le nombre à l'intérieur des barres représente le volume de chacun de ces véhicules. La barre en gris foncé figurant sous la représentation graphique de la charge de l'opérateur représente les véhicules répondant au critère de la contrainte d'espacement sur le poste de travail. Pour l'exemple, nous avons considéré la même contrainte d'espacement et cinq postes de travail différents.

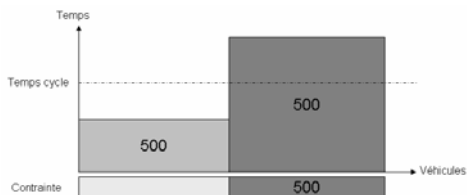


Figure 2. Poste contraint par une contrainte

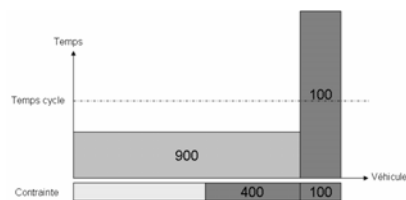


Figure 3. Poste sur contraint par une contrainte

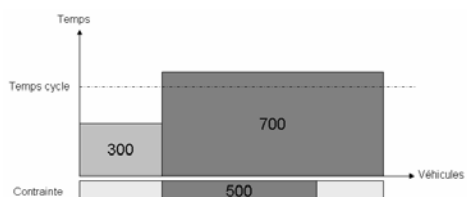


Figure 4. Poste sous contraint par une contrainte

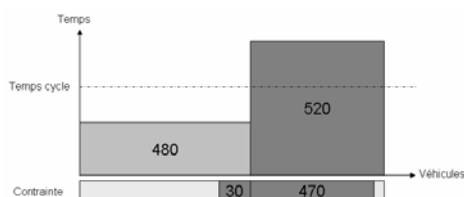


Figure 5. Poste impacté par une contrainte

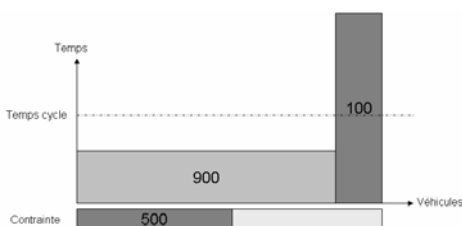


Figure 6. Poste non impacté par une contrainte

1. $V_{c_k} = V_{p_i}$, tous les véhicules provoquant un pic de charge sur le poste de travail i et uniquement ceux-là sont caractérisés par la contrainte d'espacement k . Dans ce cas, nous dirons que « le poste de travail i est contraint par la contrainte d'espacement k » (figure 2).

2. $V_{c_k} \cap V_{p_i} = V_{p_i}$ et $V_{c_k} - V_{p_i} \neq \emptyset$, tous les véhicules provoquant un pic de charge sur le poste de travail i sont caractérisés par la contrainte d'espacement k mais une partie des véhicules caractérisée par cette même contrainte d'espacement k ne provoque pas un pic de charge sur le poste de travail i . En d'autres termes, la contrainte d'espacement k sur évalue la représentation des véhicules provoquant un pic de charge sur le poste de travail i . Dans ce cas, nous dirons que « le poste de travail i est sur contraint par la contrainte d'espacement k » (Figure 3).

3. $V_{p_i} \cap V_{c_k} = V_{c_k}$ et $V_{p_i} - V_{c_k} \neq \emptyset$, tous les véhicules caractérisés par la contrainte d'espacement k provoquent un pic de charge sur le poste de travail i mais une partie des véhicules provoquant un pic de charge sur le poste de travail i n'est pas caractérisée par cette contrainte d'espacement k . En d'autres termes, la contrainte d'espacement k sous évalue la représentation des véhicules provoquant un pic de charge sur le poste de travail i . Dans ce cas, nous dirons que « le poste de travail i est sous contraint par la contrainte d'espacement k » (Figure 4).

4. $V_{c_k} \cap V_{p_i} \neq \emptyset$, $V_{p_i} \cap V_{c_k} \neq V_{c_k}$ et $V_{c_k} \cap V_{p_i} \neq V_{p_i}$, une partie seulement des véhicules provoquant un pic de charge sur le poste de travail i est caractérisée par la contrainte d'espacement k et une partie seulement des véhicules caractérisés par la contrainte d'espacement k provoque un pic de charge sur le poste de travail i . En d'autres termes, la

contrainte d'espace k évalue une partie du besoin. Dans ce cas, nous dirons que « le poste de travail i est impacté par la contrainte d'espace k » (Figure 5).

5. $V_{c_k} \cap V_{p_i} = \emptyset$, il n'existe pas de véhicule provoquant un pic de charge sur le poste de travail i caractérisé par la contrainte d'espace k . Dans ce cas, nous dirons que « le poste de travail i est non impacté par la contrainte d'espace k » (Figure 6).

Signalons que, dans la littérature, seul le cas des postes de travail contraints par une contrainte d'espace est abordé.

2.3. Hiérarchisation des relations

La principale fonction d'une contrainte d'espace est d'espacer les véhicules provoquant un pic de charge sur un poste de travail. Cet espacement doit permettre à l'opérateur de récupérer le retard pris par un véhicule avec un pic de charge avec des véhicules n'ayant pas de pic de charge. Par conséquent, la première relation (poste contraint par une contrainte) est idéale, la cinquième relation est sans intérêt et les relations intermédiaires sont difficiles à comparer comme les 3 exemples de la figure 7 le montrent.

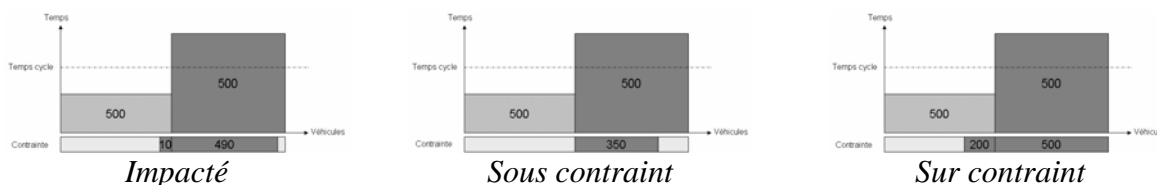


Figure 7. Exemple de nuances possibles dans les relations

Sur la figure 7, pour un même poste de travail, nous avons pris en compte 3 critères différents. Si nous devons choisir un des trois critères, lequel devons-nous prendre en compte ?

2.4. L'indicateur de pertinence

Pour mesurer le degré de pertinence entre un poste de travail i et le critère d'une contrainte d'espace k , nous proposons un nouvel indicateur que nous appelons « indicateur de pertinence », $I_{p_{i,k}}$ (équation 1).

$$I_{p_{i,k}} = \frac{\text{Card}(V_{c_k} \cap V_{p_i})}{\text{Card}(V_{p_i})} * \frac{\text{Card}(\overline{V_{c_k}} \cap \overline{V_{p_i}})}{\text{Card}(\overline{V_{p_i}})} \quad (1)$$

$$\text{Avec } \overline{V_{c_k}} = V - V_{c_k} \text{ et } \overline{V_{p_i}} = V - V_{p_i}$$

Cet indicateur de pertinence varie entre 0 et 1. « 0 » correspond au poste non impacté par la contrainte et « 1 » correspond au poste contraint par la contrainte d'espace. Cet indicateur correspond au produit de deux taux de couverture :

- Le taux de couverture des véhicules répondant au critère de la contrainte d'espace par rapport aux véhicules provoquant un pic de charge.
- Le taux de couverture des véhicules ne répondant pas au critère de la contrainte d'espace par rapport aux véhicules ne provoquant pas de pics de charge.

Un poste de travail non impacté par une contrainte d'espace a un indicateur de pertinence nul car $V_{c_k} \cap V_{p_i} = \emptyset \Leftrightarrow \text{Card}(V_{c_k} \cap V_{p_i}) = 0$. Alors qu'un poste de travail contraint par une contrainte d'espace a un indicateur de pertinence égal à 1 car $V_{c_k} = V_{p_i} \Leftrightarrow V_{c_k} \cap V_{p_i} = V_{p_i}$ et $\overline{V_{c_k}} \cap \overline{V_{p_i}} = \overline{V_{p_i}}$. Ces deux valeurs extrêmes représentent bien notre critère de choix (relation idéale et relation sans intérêt).

Dans le cas de la figure 7, le calcul de cet indicateur pour les trois critères nous donne les résultats suivants :

$$I_{p_{i,k}} = \frac{490}{500} * \frac{490}{500} = 0,96 \quad \text{Impacté} \quad I_{p_{i,k}} = \frac{350}{500} * \frac{500}{500} = 0,70 \quad \text{Sous contraint} \quad I_{p_{i,k}} = \frac{500}{500} * \frac{300}{500} = 0,60 \quad \text{Sur contraint}$$

L'utilisation de cet indicateur de pertinence pour l'exemple de la figure 7 permet de retenir le 1^{er} critère. Nous pouvons noter que l'ordre de ces 3 valeurs de l'indicateur n'est pas toujours celui de cet exemple (impacté >> sous contraint >> sur contraint). On peut modifier les données de la figure 7 pour trouver tous les ordres possibles entre les différents types de relations.

Dans la partie suivante, nous allons montrer l'intérêt de ce nouvel indicateur en analysant la relation entre cet indicateur, le respect des contraintes et les situations où un opérateur est en difficulté, i.e. fait théoriquement appel à un opérateur polyvalent.

2.5. Résultats numériques

Pour construire la figure 8, nous avons fixé le temps cycle à 2 minutes et considéré un poste de travail limité à deux temps de traitement : un temps de traitement inférieur au temps cycle pour un véhicule de base (1 minute) et un temps de traitement supérieur au temps cycle pour un véhicule ayant l'option assemblée à ce poste de travail (4 minutes). Par conséquent un véhicule provoquant un pic de charge doit être obligatoirement suivi de 2 véhicules sans pic de charge pour permettre à l'opérateur de travailler sans faire appel à un opérateur polyvalent. Dans le problème classique du séquençement des véhicules, nous définissons un ratio de 1/3. Puis, nous avons construit aléatoirement 100.000 programmes de production de 300 véhicules. Chaque véhicule a deux attributs : un attribut pour indiquer si le véhicule provoque ou non un pic de charge et un second pour indiquer si le véhicule répond ou non au critère d'une contrainte d'espacement. Le nombre de véhicules provoquant un pic de charge a été choisi aléatoirement entre 0 et 100, puis ces véhicules ont été répartis aléatoirement dans les 300 véhicules. Le nombre de véhicules répondant au critère a été choisi aléatoirement entre 0 à 300 véhicules, puis comme précédemment, ils ont été répartis aléatoirement dans les 300 véhicules. Pour chaque programme de production, nous avons calculé l'indicateur de pertinence et créé une séquence optimale en nombre de non respects de la contrainte d'espacement, puis nous avons évalué le nombre de fois qu'un opérateur polyvalent aurait dû intervenir pour aider l'opérateur en difficulté.

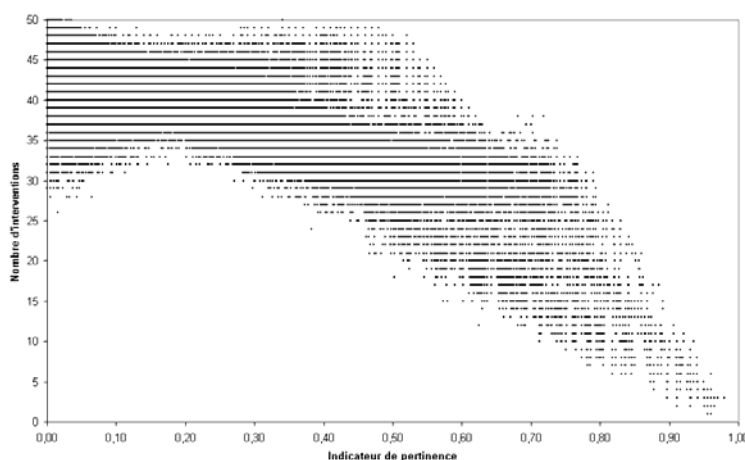


Figure 8. 100.000 programmes de production

En abscisse sur la figure 8, nous avons représenté les indicateurs de pertinence obtenus et en ordonné, nous avons représenté le nombre d'interventions mesuré.

Nous avons limité le nombre maximal de véhicules provoquant un pic de charge à un tiers du volume total (soit 100 sur 300) pour montrer que lorsque le critère contraint le poste de travail (i.e. $I_p = 1$), il n'existe pas de décalage entre le respect de cette contrainte et l'opérateur en difficulté.

Sur cette figure, plus l'indicateur de pertinence est proche de 1 et moins nous avons d'interventions, ce qui est l'objectif attendu de l'utilisation d'une contrainte d'espacement. Comme nous pouvons le noter, l'indicateur de pertinence proposé permet de mesurer la qualité du choix d'un critère.

3. Agrégation de l'indicateur de pertinence

Dans les articles précédemment cités, une contrainte d'espacement est définie pour chaque poste de travail ayant un pic de charge. Mais, appliquer cette logique à une ligne d'assemblage pose le problème du nombre. Plus le nombre de postes ayant un pic de charge est important plus les risques de ne pas pouvoir lisser la charge de travail sur tous les postes simultanément est grand. Aussi, pour éviter ce problème, il convient de limiter le problème de séquençement aux postes susceptibles de poser le plus de difficulté. Rachamadugu et al (1989) proposent un indicateur de criticité qui lui permet de classer les postes de travail par ordre d'importance. Ensuite, il suffit de sélectionner les postes de travail qui sont les plus critiques.

Dans cet article, nous avons écarté cette approche car nous avons constaté qu'un même critère pouvait répondre aux besoins de plusieurs postes de travail simultanément. Néanmoins, dans le cas où le nombre de critères à définir reste élevé, nous pourrions envisager un couplage entre ces deux approches afin de focaliser l'attention des équilibreur sur les postes de travail les plus problématiques.

Dans la suite nous proposons une méthode pour exprimer un nombre limité des contraintes pour l'ensemble de site de montage. L'indicateur de pertinence que nous venons de proposer peut être agrégé pour caractériser un poste de travail ou une ligne d'assemblage. Grâce à ces caractérisations, les équilibreurs peuvent facilement identifier les postes de travail concernés par un non respect d'une contrainte d'espacement.

3.1. Caractérisation d'un poste de travail

Nous proposons d'agréger pour un poste de travail les indicateurs de pertinence évalués pour chacune des relations entre ce poste de travail et toutes les contraintes d'espacement exprimées. Nous proposons pour cet indicateur agrégé la valeur maximale des indicateurs de pertinence des relations entre le poste de travail considéré et toutes les contraintes d'espacement exprimées (équation 2). En effet, la relation la plus pertinente conditionnera l'espacement des pics de charge sur le poste de travail.

$$I'_{p_i} = \max_{k \in C} (I_{p_i,k}) \quad (2)$$

Avec C , l'ensemble des contraintes d'espacement exprimées

La nature du poste de travail correspondra à la nature de la relation la plus pertinente. Dans le cas où deux relations ont le même indicateur de pertinence, nous choisirons arbitrairement l'ordre dans lequel nous avons présenté les différentes relations.

En classant les postes de travail par ordre croissant de pertinence, cela permettra aux équilibreurs d'identifier les postes qui nécessiteront une surveillance particulière lors de l'exécution. En effet, nous pouvons supposer que plus l'indicateur de pertinence d'un poste est faible, plus les risques d'avoir un opérateur en difficulté non identifié par un non respect d'une contrainte d'espacement seront importants (Figure 8).

3.2. Caractérisation d'une ligne d'assemblage

Pour mesurer la pertinence globale des contraintes d'espacement et des postes de travail de la ligne d'assemblage, nous proposons un indicateur, I_p , correspondant à la moyenne des indicateurs de pertinences des postes de travail ayant au moins un pic de charge (équation 3).

$$I_p = \frac{\sum_{i=1}^{Nb_p} I_{p_i}}{Nb_p} \quad \text{Avec } Nb_p, \text{ nombre de postes de travail ayant au moins un pic de charge} \quad (3)$$

4. La matrice des relations

Dans cet article, pour commencer, nous avons présenté les relations existant entre un poste de travail et une contrainte d'espacement. Puis, nous avons présenté un nouvel indicateur de pertinence permettant d'évaluer la qualité du choix d'une contrainte d'espacement pour un poste de travail. Dans la partie précédente, nous avons montré comment agréger cet indicateur pour un poste de travail et pour une ligne d'assemblage. Maintenant, nous allons présenter un outil d'aide à la décision permettant aux équilibreur de choisir les critères de contrainte d'espacement les plus adaptés à ses moyens de production.

Dans cet outil, nous proposons de représenter graphiquement et simultanément la nature et l'indicateur de pertinence de la relation entre un poste de travail et une contrainte d'espacement dans une matrice colorée (Figure 9).

A l'intersection d'un poste de travail et d'une contrainte d'espacement, nous affichons la nature de la relation en suivant le tableau de correspondance décrit par le tableau 2. La couleur des cases représente la valeur de l'indicateur de pertinence. Plus la case est foncée et plus l'indicateur de pertinence est proche de 1. A l'inverse, plus la case est blanche et plus l'indicateur de pertinence est proche de 0. L'utilisation de cette matrice colorée a pour objectif d'aider les équilibreur à choisir les critères les plus pertinents, i.e. tel que l'indicateur de pertinence de tous les postes de travail ayant un pic de charge soit le plus proche possible de 1 (le plus foncé).

Nom	Rel.	DAD	PLC	ABR	PB04	CMB	TO	FOND	3RG	SIE	BVA	ESS
5LH2529D	IMP	IMP					SOUS		IMP	SOUS	SOUS	SOUS
5LH2529G	SOUS	IMP	SOUS	SOUS	SOUS	SOUS		SOUS	IMP			
5LH3132D	SOUS	IMP	IMP	IMP	IMP	SOUS			IMP			
5LH3132G	SOUS	IMP	SOUS	IMP	IMP	IMP	IMP	IMP	IMP	IMP	IMP	IMP
5LH3135D	SOUS	IMP	IMP	IMP	SOUS	IMP		IMP	IMP			
5LH3135G	SOUS	IMP	IMP	IMP	SOUS	IMP	SOUS	IMP	IMP	IMP	IMP	IMP
5LH3137G												
5LH3237D	IMP	IMP					IMP		IMP	IMP	IMP	IMP
5LH3239D	IMP	IMP					SOUS		IMP	SOUS	SOUS	SOUS
5LH3240G	IMP	IMP	IMP	IMP	IMP	IMP	SOUS		IMP	SOUS	SOUS	SOUS
5LH3241D	IMP	IMP		IMP	IMP		SOUS	IMP	IMP	SOUS	SOUS	SOUS
5LH3241G	SOUS	IMP	SOUS	IMP	IMP	IMP		IMP	IMP			
5LH3242D	IMP	IMP	SOUS	IMP	SOUS	SOUS		IMP	IMP			
5LH3343G	IMP	IMP					IMP		IMP	IMP	IMP	IMP

Figure 9. Exemple de matrice colorée des relations

La figure 9 représente un extrait de la matrice colorée des relations du site de production de Sevel Nord en Mai 2006 du groupe PSA Peugeot Citroën. Les postes de travail de la ligne d'assemblage sont représentés en ligne. Et, les 11 contraintes d'espacement qui ont été choisies par les équilibreur au mois de Mai 2006 sont représentées en colonne. La colonne « Rel. » correspond à la nature de la relation d'un poste de travail.

5. Application à un cas réel

Pour valider l'approche décrite dans cet article, nous avons sélectionné 30 postes de travail sur le site de Sevel Nord ayant au moins un pic de charge et un programme de production de 719 véhicules du 23 Mai 2006. Nous avons comparé 3 jeux de contraintes d'espacement :

- Une contrainte d'espacement par poste de travail ayant un pic de charge telle que chaque poste de travail soit contraint par une contrainte d'espacement,
- Les 11 contraintes d'espacement définies au mois de Mai 2006,
- Un choix de 11 contraintes d'espacement obtenues avec l'aide de la matrice colorée des relations.

Les 30 contraintes d'espacement pour ces 30 postes de travail ont un indicateur de pertinence de $I_p = 1$ (équation 3) car chaque poste de travail est contraint par au moins une contrainte.

Cette situation est idéale. En optant pour cette solution sur le site de Sevel Nord, nous avons besoin de 194 contraintes d'espacement ce qui est impossible actuellement dans les systèmes d'information du groupe PSA Peugeot Citroën. Par conséquent, il faut choisir un jeu de contraintes d'espacement adapté. Comme nous l'illustrons avec les figures 10 et 11.

La figure 10 représente la pertinence des 11 contraintes d'espacement définies au mois de Mai 2006. Dans la partie de gauche, nous avons recensé les contraintes d'espacement et dans la partie de droite, nous avons représenté les indicateurs de pertinence des postes de travail triés par ordre décroissant. Ces 11 contraintes d'espacement pour ces 30 postes de travail ont un indicateur de pertinence de $I_p = 0,57$ (équation 3).

Code	Libellé
DAD	Direction à droite
PLC	Porte latérale de chargement
ABR	Anti-blocage des roues
PB04	Porte battante vitrée
CMB	Combi
TO	Toit Ouvrant
FOND	Fond de cabine
3RG	3 ^{ème} rangée de siège
SIE	Siège électrique
BVA	Boîte de vitesse automatique
ESS	Moteur Essence

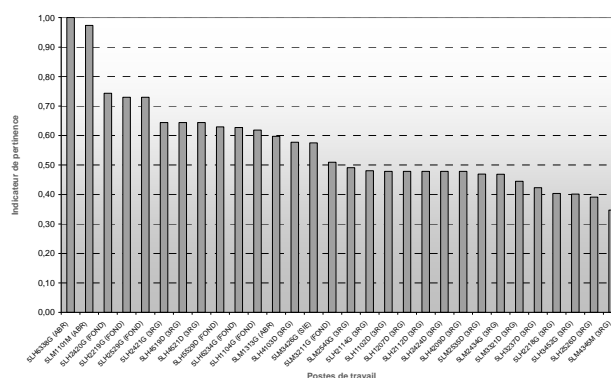


Figure 10. Les 11 contraintes d'espacement définies au mois de Mai 2006

La figure 11 représente la pertinence du choix de 11 contraintes d'espacement obtenu avec la matrice colorée des relations. Pour obtenir ces 11 contraintes d'espacement, nous sommes partis des 30 contraintes d'espacement du premier jeu de contraintes, puis nous avons éliminé les contraintes redondantes. Dans la partie de gauche, nous avons indiqué les contraintes d'espacement choisies et dans la partie de droite, nous avons représenté les indicateurs de pertinence des postes de travail triés par ordre décroissant. Ici, les contraintes d'espacement sont représentées par le nom d'un poste de travail car elles caractérisent les véhicules provoquant un pic de charge sur le poste de travail nommé. Ces 11 contraintes d'espacement pour ces 30 postes de travail ont un indicateur de pertinence de $I_p = 0,96$ (équation 3).

Code
5LH1102D
5LH1207D
5LH1104G
5LM1313G
5LM3426G
5LM3321D
5LH4519D
5LH2218G
5LM3211G
5LM1101M
5LH2420G

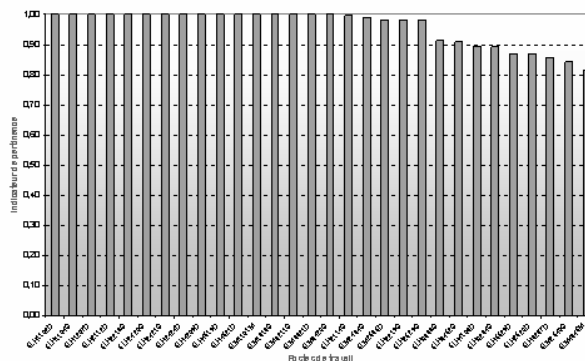


Figure 11. Les 11 contraintes d'espace choisies pour le mois de Mai 2006

Comme nous pouvons le remarquer, le choix des contraintes d'espace est important. En effet, avec un nombre restreint de contraintes d'espace, nous pouvons avoir une excellente couverture de la ligne d'assemblage. Il faut juste trouver celles qui s'adaptent le mieux. La matrice colorée des relations doit donc aider les équilibreurs à trouver les critères à espacer. Mais, ceci constitue la première étape de la définition des contraintes d'espace car la qualité d'une séquence de véhicules sur un poste de travail dépend également du ratio à respecter (Lesert, 2006).

6. Conclusion

Cet article contribue à mieux aborder le problème de séquençage des véhicules. La matrice des relations fournit un outil aux équilibreurs pour trouver une bonne adéquation entre les non respects des contraintes d'espace et les opérateurs en difficulté sur toute ou partie d'une ligne d'assemblage. Cet outil utilise notre indicateur pertinence et les relations existant entre un poste de travail et le critère d'une contrainte d'espace. De plus, en cas de non respect, cet outil permet aux équilibreurs d'identifier les postes de travail nécessitant du renfort ou une attention particulière.

Mais, la définition d'une contrainte d'espace nécessite deux éléments : un critère et un ratio à respecter. Cet article s'est orienté autour de la définition du critère. Dans un prochain article, nous aborderons la définition du ratio.

7. Références bibliographiques

- Baratou, P., 1998, « Gestion réactive de stocks intermédiaires d'un flux de production automobile », Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, soutenue le 09/03/1998
- Comby G., 1996, « Aide au séquençage des produits sur une ligne de fabrication multi modèles ». Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, soutenue le 19/12/1996
- Giard V., Jeunet J. (2006) « Modélisation du problème général d'ordonnancement de véhicules sur une ligne de production et d'assemblage », Journal Européen des Systèmes Automatisés (APII-JESA) 40(4), pages p.463-496
- Joly, A. 2005, « Etude de modes de fonctionnement réactifs et robustes aux aléas sur le flux de production d'une usine terminale automobile », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, soutenue le 21/03/2005
- Kim, Y-M (2001) « A Quick Sequencing Algorithm for a Mixed Model Assembly Line with Multiple Stations », p300-303, 27/04/2001
- Lesert, A (2006) « Sur l'évaluation de la flexibilité de l'atelier montage d'une usine terminale automobile », Thèse de doctorat soutenue le 18/12/2006, Institut Polytechnique National de Grenoble
- Parello B., Kabat WC, Wos L (1986) « Job-Shop Scheduling using Automated Reasoning : a case of study of the Car-Sequencing Problem », Journal of Automated Reasoning, n°2
- Rachamadugu, R., Yano, C.A. (1989) « Analytical tools for assembly line design and sequencing », Technical Report 89-28, Septembre 1989
- Yano, C.A., Rachamadugu, R. (1991) « Sequencing to minimize work overload in assembly lines with product options », Management science, Vol n°37, n°5, Mai 1991, p572-586