

CLASSIFICATION DES POSTES DE TRAVAIL SELON LEUR FLEXIBILITE DANS UNE USINE TERMINALE AUTOMOBILE

A. LESERT, G. ALPAN, Y. FREIN

Laboratoire G-SCOP INPG-UJF-CNRS,
46 Avenue Félix Viallet,
38031 Grenoble Cedex

aymeric.lesert@wanadoo.fr, gulgun.alpan@g-scop.inpg.fr, yannick.frein@g-scop.inpg.fr

S. NOIRÉ

PSA Peugeot Citroën,
45, rue Jean-Pierre Timbaud,
78307 Poissy Cedex

stephane.noire@mpsa.com

RESUME : Dans cet article, nous proposons une classification des postes de travail selon leur niveau de flexibilité sur une ligne d'assemblage à modèles mélangés dans une usine terminale automobile. La classification des postes de travail repose sur une mesure de la différence entre la capacité maximale de production de véhicules provoquant un pic de charge et un niveau de production prévu en fonction d'un équilibrage donné. Cette classification permet de décrire les postes de travail en quatre catégories qui vont orienter les investissements nécessaires afin d'adapter les moyens de production en fonction des données prévisionnelles.

MOTS-CLES : Flexibilité, Ligne d'assemblage à modèles mélangés, Séquencement

1. INTRODUCTION

Une ligne d'assemblage est une succession de postes de travail. La fabrication d'un véhicule sur une ligne d'assemblage automobile nécessite des milliers d'opérations. Les véhicules avancent en continu et passent de poste en poste sans s'arrêter et toujours dans le même ordre. Ils avancent tous à la même vitesse et sont disponibles pour un opérateur durant un même laps de temps, appelé le temps de cycle. L'équilibrage consiste à affecter les opérations aux postes de travail tel que la charge de travail sur chacun d'eux soit la plus homogène possible. C'est un traitement long et coûteux, étudiée mensuellement à partir de données prévisionnelles (Boutevin, 2003). L'équilibrage est très complexe quand il s'agit d'une ligne de montage à modèles mélangés : chaque modèle de véhicules a ses propres contraintes de précédences à respecter, pour des raisons d'outillages certaines opérations devront être regroupés ou bien obligatoirement affectés sur différents postes, pour des raisons d'ergonomie, certaines combinaisons d'opérations sont à éviter pour un même opérateur, Par conséquent, pour des raisons de coûts et des contraintes industrielles, il est possible que l'opérateur d'un poste de travail ait besoin pour certains véhicules d'un temps de travail supérieur au temps cycle. Ces véhicules constituent des « pics de charge » et contraignent l'ordonnancement des véhicules. Ces véhicules doivent être espacés pour permettre aux opérateurs de récupérer la surcharge occasionnée (Giard et Jeunet, 2006). Cet espacement est garanti au cours de l'ordonnancement grâce au respect d'une contrainte d'espacement. Pour garantir le respect de cette contrainte d'espacement, le nombre de ces véhicules doit être

limité. Par conséquent, cela conduit à contraindre le volume de certains types de véhicules.

L'équilibrage de la ligne d'assemblage est réalisé en fonction des données prévisionnelles mensuelles. Or, les données prévisionnelles peuvent comporter des erreurs. Puis, lors du séquencement des véhicules commandés par les clients, les contraintes d'espacement ne sont pas toujours faciles à respecter (Lesert et al., 2006). Enfin, à tout moment et en présence d'aléas de production, les opérateurs doivent être capables de travailler en minimisant la sollicitation de renforts. Par conséquent, il est naturel d'envisager de la flexibilité pour absorber :

- les erreurs de prévisions,
- les difficultés de séquencement des véhicules,
- les aléas de production.

Une ligne d'assemblage, équilibrée sans flexibilité, *i.e.* au respect strict des données prévisionnelles, risque de ne pas absorber sans surcoût ou sans délai un des 3 phénomènes décrits ci-dessus. A contrario, une ligne d'assemblage trop flexible peut présenter un risque d'avoir trop de ressources (main d'œuvre, matériel, ...) et donc un coût de fabrication plus élevé.

Dans notre article, nous présenterons une classification des postes de travail en fonction de différents niveaux de flexibilité. Cette classification a pour objectif de permettre aux décideurs, en l'occurrence, les responsables de l'équilibrage de la ligne d'assemblage, de trouver le meilleur compromis entre les moyens à mettre en œuvre pour produire les véhicules pouvant être commandés par les clients et les différents niveaux de flexibilité nécessaire pour assurer la production à moindre frais. Jusqu'à la proposition de notre

classification, PSA Peugeot Citroën ne disposait pas de méthodes pour trouver ce compromis.

Dans un premier temps, nous aborderons la flexibilité décrite dans la littérature scientifique. Dans un deuxième temps, nous présenterons le calcul d'évaluation de la capacité maximale de production pour chacune des contraintes d'espacement. Or, sans cette information, l'identification des postes de travail à adapter peut être incorrecte. Puis, nous présenterons nos indicateurs de flexibilité et nous proposerons une classification des postes de travail en fonction de différents niveaux de flexibilité. Enfin, nous terminerons par l'application de cette classification à un cas industriel sur le site de production de Sevel Nord.

2. LA FLEXIBILITE

De manière générale, la flexibilité traduit l'aptitude d'un système à répondre aux modifications de son environnement afin d'assurer le respect de ses objectifs (Erol, 1999). Par analogie, la flexibilité d'une usine terminale automobile traduit la capacité des moyens de production à répondre aux variations de production, les erreurs de prévisions et les difficultés de séquençement des véhicules, en minimisant les coûts de production.

2.1. Les besoins de flexibilité

Selon l'approche de (Corrêa, 1994a), les deux raisons pour lesquelles une entreprise doit recourir à la flexibilité sont : l'incertitude et la variabilité. Dans sa classification, l'incertitude correspond aux événements qui ne peuvent pas être prévus ou qui ne peuvent pas être modélisés par des approches probabilistes. Leur source est interne lorsqu'il s'agit d'aléas de production ou d'absentéismes, ou externe lorsqu'il s'agit d'un retard de livraison ou d'une modification législative. La variabilité concerne la variation des quantités demandées ou de l'assortiment des produits à fabriquer. Même si la variabilité peut être prévisible, l'entreprise doit anticiper cette variabilité en disposant d'un potentiel de flexibilité. Ce potentiel permet d'absorber ces variations sans surcoût excessif.

Pour Corrêa, (Corrêa, 1994b), la flexibilité de la structure d'un système de production repose sur 4 éléments qu'il faut ajuster simultanément :

- La possibilité de production (« capability ») correspond à la capacité de l'entreprise à produire une certaine diversité de produits,
- La capacité de production (« capacity ») correspond à la capacité de l'entreprise de faire face à une variation de volume,
- L'utilisation des ressources (« utilization ») correspond à la capacité de l'entreprise de disposer des ressources juste nécessaires au bon moment,
- L'adaptabilité (« switchability ») correspond à la capacité de l'entreprise à adapter ses moyens de

production aux différents produits rapidement, facilement et à moindre coût.

Pour disposer d'une ligne d'assemblage automobile flexible, l'équilibrage doit considérer les 4 éléments ci-dessus simultanément. Les responsables de l'équilibrage doivent dimensionner les postes de travail pour qu'ils soient capables de produire les véhicules commandés par les clients et transmis par la direction commerciale (« capability » et « capacity »). Pour répondre à ce besoin, le nombre d'opérateurs doit être évalué au mieux pour ne pas être sur ou sous utilisé (« utilization »). Et, les tâches doivent être réparties pour permettre aux opérateurs d'absorber les variations et les aléas sans solliciter l'aide d'opérateurs supplémentaires (« switchability »). Pour parvenir à un bon compromis, il faut mesurer la flexibilité disponible et l'ajuster à celle demandée.

2.2. La flexibilité en ordonnancement

La flexibilité et la robustesse en ordonnancement sont deux concepts très liés (Billaut et al., 2005). Intuitivement, il est d'autant plus facile de proposer une méthode robuste, que la flexibilité qui lui est accordée est grande. La flexibilité est le degré de liberté dont on dispose pour construire un ordonnancement. Et, un ordonnancement est robuste si sa performance est peu sensible à l'incertitude des données et aux aléas.

Dans le cadre de notre article, la robustesse est une résultante de la flexibilité offerte par l'atelier montage. En effet, dans un premier temps, la flexibilité d'un poste de travail de la ligne d'assemblage correspond à sa capacité à faciliter le lissage de la charge de travail de l'opérateur lors de l'ordonnancement. Et, dans un deuxième temps, cette séquence est d'autant plus robuste qu'elle conserve le lissage de la charge de travail malgré un aléa de production.

2.3. Les mesures de la flexibilité

Dans cet article, nous nous sommes inspirés de l'évaluation de la flexibilité en volume, proposée par (Parker et Wirth, 1999). Cette évaluation, F , repose sur une mesure de la différence entre deux limites : la capacité maximale de production, C_{max} , et la capacité correspondant au seuil de rentabilité, $Seuil$ (équation 1).

$$F = \frac{C_{max} - Seuil}{C_{max}} \quad (1)$$

Dans notre étude, la capacité maximale de production correspond au nombre maximal de véhicules provoquant un pic de charge que nous pouvons produire sans modifier les infrastructures, ni renforcer les opérateurs par des appels à des opérateurs polyvalents. Le seuil de rentabilité considéré représente le nombre prévisionnel de ces véhicules car les moyens de production mis en œuvre par l'équilibrage doivent obligatoirement être capables de produire les volumes prévus.

L'évaluation de la capacité maximale de production n'est pas triviale. Dans la partie qui suit, nous présenterons le calcul de cette capacité.

3. EVALUATION DE LA CAPACITE MAXIMALE DE PRODUCTION

Nous avons dégagé deux façons de calculer la capacité maximale de production : statique et dynamique.

Tout d'abord, nous aborderons la capacité maximale statique et dynamique pour un poste de travail, puis, pour plusieurs postes de travail. Dans les deux cas, l'évaluation de la capacité maximale pour plusieurs postes de travail correspond à l'évaluation de la capacité maximale pour une contrainte d'espacement.

3.1. La capacité maximale statique

La capacité maximale statique, Q'_{max} , consiste à évaluer le nombre maximal de véhicules provoquant un pic de charge telle que la charge de travail de l'opérateur soit le plus proche possible de l'objectif visé. Dans le contexte de cette étude, l'objectif visé est atteint lorsque le poste de travail a un coefficient d'équilibrage correspondant au coefficient d'équilibrage fixé dans les bonnes pratiques du groupe, Ke_{obj} . Le coefficient $(Ke_{obj})^{-1}$ reflète le taux d'occupation de l'opérateur.

3.1.1. Pour un poste de travail

Dans une usine terminale automobile, chaque poste de travail peut traiter différents types de véhicules. Chacun de ces véhicules peut avoir un différent temps de traitement sur le poste de travail. Nous utiliserons la notation $T_{i,j}$ pour représenter le temps de traitement du véhicule j sur le poste de travail i , et T_{cycle} , pour représenter la cadence de la ligne de montage.

Pour simplifier les calculs, nous avons considéré deux groupes de véhicules par poste de travail : les véhicules ne provoquant pas de pic de charge (i.e. $T_{i,j} \leq T_{cycle}$) et les véhicules provoquant un pic de charge (i.e. $T_{i,j} > T_{cycle}$). On suppose que chaque groupe de véhicule a le même temps de traitement. Pour les véhicules avec $T_{i,j} \leq T_{cycle}$ (respectivement $T_{i,j} > T_{cycle}$) nous avons estimé le temps de traitement par T_{inf_i} (respectivement T_{sup_i}) comme illustré sur la figure 1.

Avec cette simplification, il est alors aisé d'évaluer la capacité maximale statique pour le poste de travail i , Q'_{max_i} (équation 2).

$$\frac{Q_{tot} * T_{cycle}}{(Q_{tot} - Q'_{max_i}) * T_{inf_i} + Q'_{max_i} * T_{sup_i}} \leq Ke_{obj} \quad (1)$$

Soit

$$Q'_{max_i} = \left[Q_{tot} * \frac{T_{cycle} - T_{inf_i}}{T_{sup_i} - T_{inf_i}} * Ke_{obj} \right] \quad (2)$$

Où Q_{tot} est le nombre total de véhicules à fabriquer.

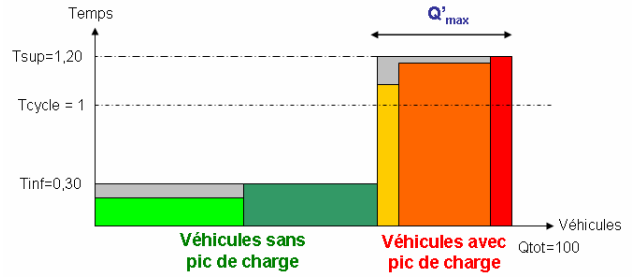


Figure 1. Représentation de la charge de travail d'un poste de travail

Pour illustrer ce calcul, nous avons considéré le poste de travail dont la charge de travail est représentée sur la figure 1. Nous avons simplifié les temps de traitement des deux groupes de véhicules en considérant la situation correspondante au pire des cas ($T_{inf_i} = 0,30$ et $T_{sup_i} = 1,20$). Nous notons qu'il est également possible de considérer une situation optimiste, ou un cas correspondant au temps moyen des traitements, ou encore bien d'autre cas (par exemple, écrêté).

Pour cet exemple, le coefficient d'équilibrage objectif est $Ke_{obj} = 1,12$ (soit environ 89% de la charge de travail de l'opérateur). Le nombre de véhicules total à produire par jour de production est $Q_{tot} = 100$. Le nombre maximal de véhicules provoquant un pic de charge que nous pouvons produire sur ce poste de travail est donc 65.

$$Q'_{max_i} = \left[Q_{tot} * \frac{T_{cycle} - T_{inf_i}}{T_{sup_i} - T_{inf_i}} * Ke_{obj} \right] \Rightarrow Q'_{max_i} = \left[100 * \frac{1 - 0,30}{1,20 - 0,30} * 1,12 \right] = 65$$

3.1.2. Pour une contrainte d'espacement

Une contrainte d'espacement peut contraindre plusieurs postes de travail. Chacun de ces postes de travail se comporte alors comme un goulet d'étranglement qui limite la quantité maximale de certains véhicules. Par conséquent, la capacité maximale statique d'une contrainte d'espacement ne peut pas être supérieure à la plus petite capacité maximale statique des postes de travail contraints par la contrainte d'espacement (équation 3).

$$Q'_{max_c} = \min_{i \in Pc_c} (Q'_{max_i}) \quad (3)$$

Où P_c est l'ensemble des postes contraints par la contrainte d'espacement c .

3.2. La capacité maximale dynamique

La capacité maximale dynamique, Q_{max} , correspond au nombre maximal de véhicules provoquant un pic de charge qui peuvent être séquencés en respectant le ratio d'une contrainte d'espacement permettant aux opérateurs de travailler sans solliciter l'aide d'un opérateur polyvalent. Cette capacité maximale est calculée avec l'équation 4.

$$Q_{max} = \left\lfloor \frac{N}{P} * Q_{tot} \right\rfloor \quad (4)$$

Dans l'équation (4), N/P correspond au ratio de la contrainte d'espacement pour un poste de travail donné. Nous allons dans la suite présenter comment calculer ce ratio et plus précisément les deux termes N et P .

3.2.1. Pour un poste de travail

Pour calculer la capacité maximale dynamique, Q_{max} , pour un poste de travail, il faut d'abord calculer le ratio N/P de la contrainte d'espacement pour ce poste de travail.

N/P peut être calculé soit en fonction de volume à produire, soit en fonction de l'espace de travail. Des études précédentes ont montré que la deuxième méthode est plus juste en terme de la réalité du terrain (Giard et Jeunet, 2006), (Lesert, 2006). Nous allons brièvement expliquer le principe de calcul de N/P en fonction de l'espace de travail de l'opérateur. Pour plus de détail le lecteur peut se référer à (Giard et Jeunet, 2006) et (Lesert, 2006).

Nous rappelons que dans la liste des véhicules à engager sur le site de montage, les véhicules provoquant un pic de charge doivent être espacés pour permettre aux opérateurs de récupérer le retard accumulé par le montage de ces véhicules. Cet espacement est réalisé à l'aide des contraintes d'espacement définis par un critère (i.e. présence d'une ou plusieurs options sur un véhicule) et un ratio N/P . C'est-à-dire, dans la séquence des véhicules à fabriquer, on peut avoir au plus N véhicules provoquant un pic de charge (comportant le critère) sur une fenêtre glissante de P véhicules.

Pour le calcul de N/P en fonction de l'espace de travail de l'opérateur, tout d'abord nous observons les mouvements de l'opérateur dans son poste de travail (figure 2).

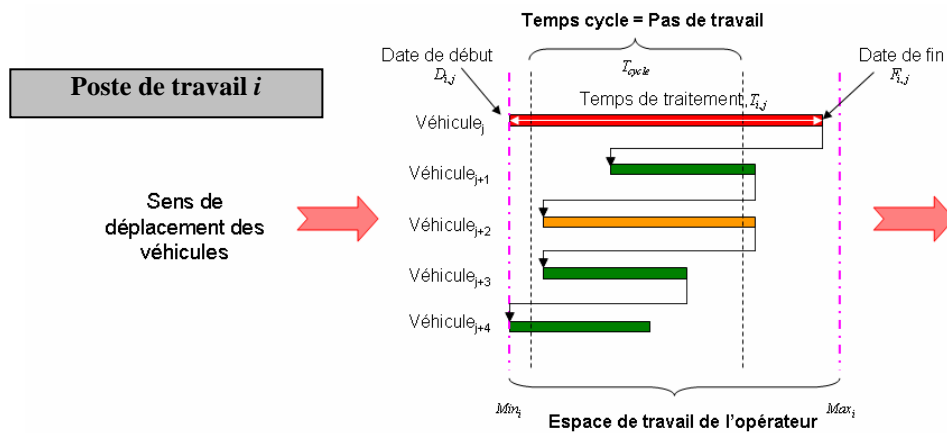


Figure 2. Représentation graphique de déplacements d'un opérateur

Un opérateur affecté au poste de travail, i , travaille dans un espace de travail délimité par une limite minimale, Min_i , et une limite maximale, Max_i . Min_i sera toujours négative ou nulle et Max_i sera toujours égale ou supérieure au temps cycle, T_{cycle} . Tant que l'opérateur demeure dans cet espace de travail, il ne gênera pas les opérateurs qui le précèdent ou le suivent sur la ligne d'assemblage. La date de début du traitement d'un véhicule j sur le poste de travail i , $D_{i,j}$, peut commencer dès la limite Min_i et la date de fin de son traitement, $F_{i,j}$ peut aller jusqu'à la limite maximale, Max_i .

Les véhicules ayant un temps de traitement $T_{i,j} > T_{cycle}$ (e.g. véhicule j dans la figure 2) provoquent un pic de charge et doivent être suivis des véhicules ayant $T_{i,j} \leq T_{cycle}$ (e.g. les véhicules $j+1, \dots, j+4$ dans la figure 2) pour récupérer le retard accumulé par le traitement de ce véhicule. Nous notons que les temps de traitement des véhicules, $T_{i,j}$ ne sont pas homogènes, comme illustré dans la figure 2. Pour simplifier les calculs, nous utilisons la même simplification présentée dans la section 3.1.1. Par conséquent, un poste de travail ayant une forte diversité de temps de traitement est

simplifié à deux temps : T_{inf_i} pour les véhicules avec $T_{i,j} \leq T_{cycle}$ et T_{sup_i} pour les véhicules avec $T_{i,j} > T_{cycle}$.

Un véhicule provoquant un pic de charge occasionne pour l'opérateur un retard de $R_{sup} = T_{sup} - T_{cycle}$ supplémentaire. Et, avec un véhicule sans pic de charge, il peut récupérer $R_{inf} = T_{cycle} - T_{inf}$.

Le calcul de ratio d'une contrainte d'espacement revient alors à trouver le nombre de véhicules ne provoquant pas de pic de charge nécessaire ($P-N$) pour absorber une succession de N véhicules provoquant un pic de charge. Les paramètres de N/P sont alors calculés par l'équation 5 (Lesert, 2006).

$$N = \left\lfloor \frac{R_{max}}{R_{sup}} \right\rfloor \text{ et } P = N + \left\lfloor \frac{N * R_{sup}}{R_{inf}} \right\rfloor \quad (5)$$

Pour illustrer le calcul de Q_{max} pour un poste de travail, nous reprenons l'exemple de la figure 1. Pour ce poste, l'espace de travail est limité par $Min_i=0$, et $Max_i=1,3$. Donc, selon l'équation (5), le ratio à appliquer sur ce poste de travail est 1/2.

Par conséquent, selon l'équation (4), nous pouvons, théoriquement, engager $Q_{max} = \lfloor 100 * (1/2) \rfloor = 50$ véhicules sans provoquer de non respects du ratio 1/2.

3.2.2. Pour une contrainte d'espacement

Similairement à la procédure de la section 3.1.2, dans le cas de la capacité maximale dynamique pour une contrainte d'espacement, nous devons trouver un ratio N/P unique qui s'applique à tous les postes de travail concernés par cette contrainte d'espacement.

Pour chacun des postes de travail i contraint par la contrainte d'espacement c , nous évaluons le ratio à appliquer selon l'équation (5). Pour chacun des ratios différents, nous construisons l'ensemble de ses ratios compatibles Rc_{N_i/P_i} . Un ratio N_j/P_j est dit compatible avec un ratio N_i/P_i si toutes les séquences de véhicules respectant le ratio N_i/P_i respectent également le ratio N_j/P_j . Ici nous ne présenterons pas le calcul de Rc_{N_i/P_i} mais le lecteur peut consulter (Lesert, 2006) pour plus d'information. Enfin, nous pouvons sélectionner, parmi l'ensemble de ratios compatibles, Cc_c (équation 6), un ratio commun à tous les postes de travail.

$$Cc_c = \bigcap_{i \in Pc_c} Rc_{N_i/P_i} \quad (6)$$

Avec Pc_c , ensemble des postes contraints par la contrainte d'espacement c .

Pour produire le plus grand nombre de véhicules sans dépasser la limite maximale de l'espace de travail, il est possible de choisir le ratio N_c/P_c tel que ce ratio ait le rapport le plus élevé (équation 7).

$$N_c/P_c = \max_{x \in Cc_{N_p/P_p}} (x) \quad (7)$$

Par exemple, considérons deux postes de travail contraints par une contrainte d'espacement, c . Le premier poste accepte un ratio de 1/2 et le deuxième un ratio de 2/5.

L'ensemble des ratios compatibles du ratio 1/2 correspond à $Rc_{1/2} = \{1/2, 1/3, 1/4, 1/5, \dots\}$. L'ensemble des ratios compatibles du ratio 2/5 correspond à $Rc_{2/5} = \{2/5, 2/6, 2/7, \dots, 1/3, 1/4, 1/5, \dots\}$. L'ensemble des ratios compatibles communs aux deux postes correspond à $Cc = \{1/3, 1/4, 1/5, \dots\}$. Comme nous souhaitons produire le plus de véhicules possible avec un pic de charge sur les deux postes simultanément, nous sélectionnerons le ratio 1/3 à appliquer dans le site de montage.

3.3. Les pertes d'efficacité

Lors du calcul de la capacité maximale dynamique, Q_{max} , premièrement nous simplifions les temps des postes de travail concernés (Cf. 3.2.1). Puis, nous calculons un ratio N/P pour chaque poste de travail. Enfin, nous choisissons un ratio compatible et commun à tous les postes de travail (Cf. 3.2.2) contraints par la contrainte d'espacement.

A chacune de ces étapes, nous perdons en productivité potentielle et donc en efficacité. Nous allons présenter quelques indicateurs pour évaluer cette perte.

3.3.1. Due à la simplification des temps

La perte d'efficacité due à la simplification des temps de traitement, P_{temps_i} , correspond à l'écart entre la charge de travail avec deux types de véhicules et la charge de travail effective (équation 8). Soit Q_i le nombre de véhicules provoquant un pic de charge. La charge de travail avec deux types de véhicules correspond à la somme de la charge de travail des véhicules provoquant un pic de charge, $Q_i * T_{sup_i}$, et de la charge de travail des véhicules ne provoquant pas de pic de charge, $(Q_{tot} - Q_i) * T_{inf_i}$. La charge de travail effective correspond à la somme des temps de traitement des différents véhicules, $\sum_{j=1}^{Q_{tot}} T_{i,j}$. Les parties grises de la figure 1 représentent cette perte d'efficacité.

$$P_{temps_i} = \frac{(Q_i * T_{sup_i} + (Q_{tot} - Q_i) * T_{inf_i}) - \sum_{j=1}^{Q_{tot}} T_{i,j}}{Q_{tot} * T_{cycle}} \quad (8)$$

Nous allons illustrer le calcul de cet indicateur avec le poste de travail dont la charge est représentée par la figure 1. Les temps de traitement des véhicules sur ce poste de travail se répartissent selon le tableau 1.

Véhicule	Temps de traitement	Quantité
Véhicules ne provoquant pas de pic de charge		
Type 1	0,25 minute	30
Type 2	0,30 minute	35
Véhicules provoquant un pic de charge		
Type 3	1,10 minute	5
Type 4	1,18 minute	25
Type 5	1,20 minute	5

Tableau 1. Temps de traitement des différents types de véhicules

La perte d'efficacité due à la simplification des temps de traitement pour ce poste de travail est de 2,5% de la charge maximale de l'opérateur sur ce poste de travail.

$$P_{temps_i} = \frac{(Q_i * T_{sup_i} + (Q_{tot} - Q_i) * T_{inf_i}) - \sum_{j=1}^{Q_{tot}} T_{i,j}}{Q_{tot} * T_{cycle}} = \frac{(35 * 1,2 + (100 - 35) * 0,3) - 59}{100 * 1} = 2,5\%$$

3.3.2. Due au calcul du ratio N/P d'un poste de travail

La perte d'efficacité due au calcul du ratio N/P d'un poste de travail i , P_{ratio_i} , correspond à l'écart entre la capacité maximale statique (équation 2), et la capacité maximale dynamique (équation 4), d'un poste de travail (équation 9).

$$P_{ratio_i} = Q'_{max_i} - Q_{max_i} \quad (9)$$

Comme nous pouvons le constater sur l'exemple précédent, nous perdons la possibilité de produire $P_{ratio_i} = 65 - 50 = 15$ véhicules car il existe un écart entre la capacité maximale statique et la capacité maximale dynamique. Pour éviter de renforcer le poste de travail à cause d'un non respect, il faut limiter le nombre de véhicules provoquant un pic de charge sur ce poste de travail à 50, soit la capacité maximale dynamique. Par conséquent quoiqu'il arrive, un dépassement de ce nombre de véhicules provoquera un non respect et, éventuellement, l'intervention d'un opérateur polyvalent.

3.3.3. Due au calcul du ratio N/P d'une contrainte d'espacement

La perte d'efficacité pour un poste de travail i , due au choix d'un ratio N/P compatible et commun à tous les postes de travail contraints par la même contrainte d'espacement c , P'_{ratio_i} (équation 10), correspond à l'écart entre la capacité maximale statique d'un poste de travail i contraint par la contrainte d'espacement c , Q'_{max_i} , et la capacité maximale dynamique de la contrainte d'espacement c , Q_{max_c} calculé en utilisant le N_c/P_c unique pour la contrainte c (équation 7).

$$P'_{ratio_i} = Q'_{max_i} - Q_{max_c} \quad (10)$$

En poursuivant avec l'exemple précédent, si nous supposons que le ratio d'une contrainte d'espacement contraignant ce poste de travail vaut $1/3$, la perte d'efficacité due au choix du ratio représentera $P'_{ratio_i} = 65 - \lfloor 100 * 1/3 \rfloor = 32$ véhicules.

3.4. Conseils pour un équilibrage sans perte

Pour minimiser ces pertes, nous préconisons un équilibrage qui favorise, pour les postes de travail ayant des véhicules provoquant des pics de charge, une répartition des tâches qui aboutit à deux groupes de véhicules avec des temps les plus homogènes possibles, i.e. temps de traitement proches de T_{inf_i} et de T_{sup_i} .

Cette répartition des tâches doit également conduire tous les postes de travail contraints par une même contrainte d'espacement à avoir des ratios identiques.

Actuellement, le coefficient d'équilibrage est le seul indicateur utilisé par les équilibrateurs pour évaluer la qualité d'un équilibrage, et ceci est insuffisant. Par conséquent, nous préconisons la prise en compte des ratios, ci-dessus. Conscients que cela n'est pas facile à réaliser, nous proposons, dans la suite de cette étude, des indicateurs de flexibilité qui nous fourniront des informations orientant les équilibrateurs sur les postes de travail à adapter.

4. LES INDICATEURS DE FLEXIBILITE

Dans cette partie, nous allons montrer comment mesurer différents types de flexibilité : la flexibilité potentielle totale FP_{totale} et les flexibilités potentielles supplémentaires (F.P.S.) présentes dans un équilibrage donné pour chacun des postes de travail.

Les indicateurs de flexibilité potentielle sont calculés pour chaque poste de travail ayant au moins un véhicule provoquant un pic de charge en utilisant le principe de l'équation 1.

Pour PSA Peugeot Citroën, cette mesure se décline selon le calcul de trois marges de sécurisation dépendantes de différents niveaux demandés de flexibilité :

- Sans marge de sécurisation ; cela correspond aux données prévisionnelles brutes.
- Avec une marge de sécurisation correspondant à la flexibilité offerte au commerce ; cette marge est définie pour permettre à la direction commerciale d'absorber leurs erreurs de prévision.
- Avec une marge de sécurisation correspondant à la flexibilité demandée au montage ; cette marge est définie pour permettre à l'atelier montage d'absorber en plus des erreurs de prévisions, les difficultés liées au séquençement et les aléas de production.

L'indicateur de flexibilité potentielle totale, FP_{totale} , est en lien avec le premier niveau de flexibilité exprimé ci-dessus. Il mesure l'écart entre la consommation moyenne journalière prévisionnelle, CMJ , sans marge de sécurisation et la capacité maximale dynamique de production des véhicules provoquant un pic de charge, Q_{max} (équation 11). La CMJ prévisionnelle est calculée en fonction des données prévisionnelles mensuelles et du nombre de jours travaillé durant le mois. Et la Q_{max} est calculée en utilisant les équations (4) et (7).

$$FP_{totale} = \frac{Q_{max} - CMJ}{Q_{max}} \quad (11)$$

Les flexibilités potentielles supplémentaires correspondent aux niveaux de flexibilité 2 et 3 donnés ci-dessus. Elles expriment l'écart entre la consommation moyenne journalière prévisionnelle, CMJ , majorée par une marge de sécurisation et la capacité maximale dynamique de production des véhicules provoquant un pic de charge sur ce même poste, Q_{max} . Cette flexibilité est dite potentielle car elle correspond à une marge de sécurisation présente sans modification de l'équilibrage. Et, elle peut être supplémentaire car elle correspond à une marge de sécurisation qui n'a pas été nécessairement demandée.

L'indicateur de flexibilité potentielle supplémentaire pour le commerce (niveau 2), $FPS_{commerce}$, mesure l'écart entre la consommation moyenne journalière prévisionnelle, CMJ , majorée de la marge de sécurisation offerte au commerce, $Marge_{commerce}$, et la capacité maximale de production des véhicules provoquant un pic de charge, Q_{max} (équation 12).

$$FPS_{commerce} = \frac{Q_{max} - (CMJ + Marge_{commerce})}{Q_{max}} \quad (12)$$

L'indicateur de flexibilité potentielle supplémentaire pour le montage (niveau 3), $FPS_{montage}$, mesure l'écart entre la consommation moyenne journalière prévisionnelle, CMJ , majorée de la marge de sécurisation demandée au montage, $Marge_{montage}$, et la capacité maximale de production des véhicules provoquant un pic de charge, Q_{max} (équation 13).

$$FPS_{montage} = \frac{Q_{max} - (CMJ + Marge_{montage})}{Q_{max}} \quad (13)$$

5. CLASSIFICATION DES POSTES DE TRAVAIL

En fonction de la valeur des trois indicateurs de flexibilité pour un poste de travail, nous proposons une classification. Elle compte 4 classes de dimensionnement des postes de travail présentées par ordre décroissant d'importance :

1. Un poste de travail sous dimensionné, *i.e.* $FP_{totale} \leq 0$, n'est pas dimensionné pour accepter les véhicules prévisionnels (figure 3). Par conséquent, le renforcement de ce poste de travail sera inéluctable et nécessitera la mise en place d'une équipe d'opérateurs polyvalents pour intervenir fréquemment et rapidement.
2. Un poste de travail insuffisamment dimensionné, *i.e.* $FP_{totale} \geq 0$ et $FPS_{commerce} \leq 0$, produit les véhicules prévisionnels mais la variation commerciale risque de ne pas être absorbée (figure 4). La flexibilité offerte au commerce est contractuelle et le commerce s'engage à respecter ce volume. Mais, pour les journées où le nombre de véhicules provoquant un pic de charge excède la consommation moyenne journalière prévisionnelle, l'espacement de ces véhicules ne permettra pas toujours à l'opérateur de travailler sans solliciter l'aide ponctuelle d'un opérateur polyvalent.
3. Un poste de travail présentant un risque de non absorption des aléas et des difficultés liées à l'ordonnancement, *i.e.* $FPS_{commerce} \geq 0$ et $FPS_{montage} \leq 0$, est un poste de travail pour lequel les équilibrateurs prennent un risque (figure 5). En effet, il peut être plus avantageux de renforcer ponctuellement le poste de travail que de le sur dimensionner pour le mois complet. Par conséquent, lorsqu'un aléa de production intervient ou lorsqu'une difficulté de séquençement est identifiée, le responsable de l'équilibrage préférera renforcer avec un opérateur polyvalent le poste de travail concerné.

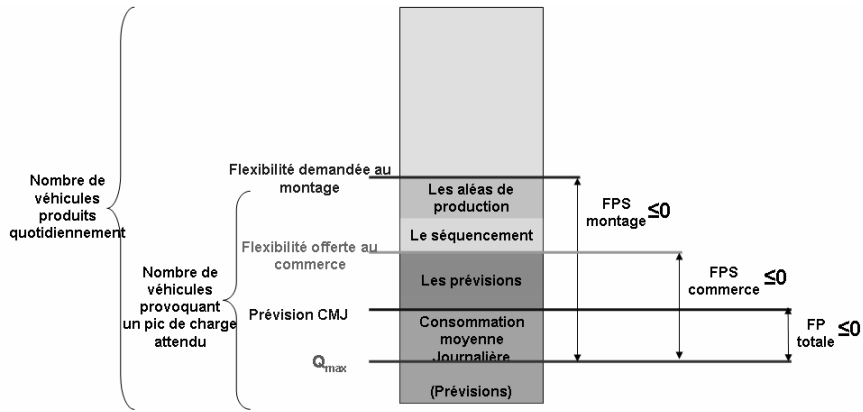


Figure 3. Un poste sous dimensionné

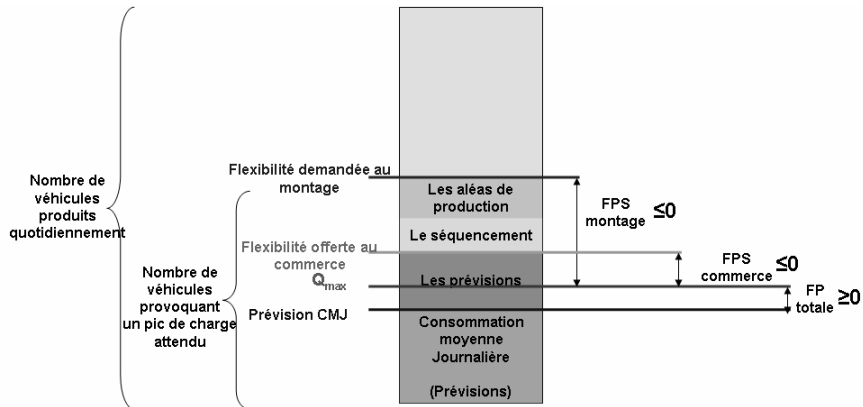


Figure 4. Poste insuffisamment dimensionné

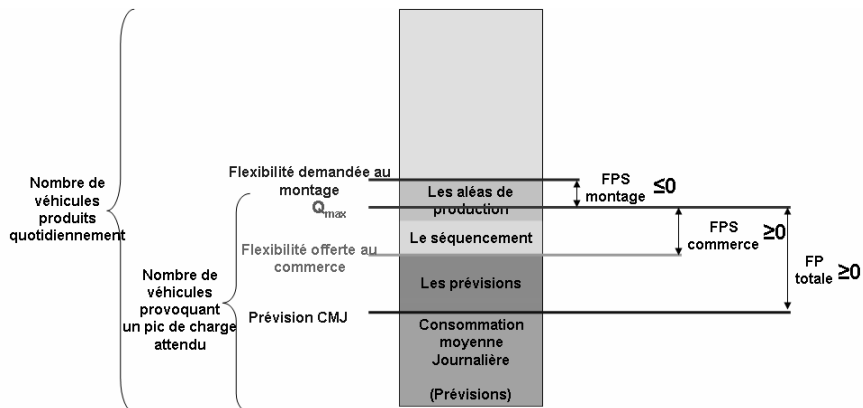


Figure 5. Poste présentant un risque de non absorptions des aléas

4. Un poste de travail sur dimensionné, *i.e.* $FPS_{montage} \geq 0$, a un dimensionnement suffisant pour absorber les erreurs de prévisions, les difficultés de séquençement et les aléas de production (figure 6). Néan-

moins, il faut être vigilant pour qu'il ne soit pas trop sur dimensionné, ce qui engendrerait des surcoûts importants. La magnitude de $FPS_{montage}$ nous permet de détecter la gravité du surdimensionnement.

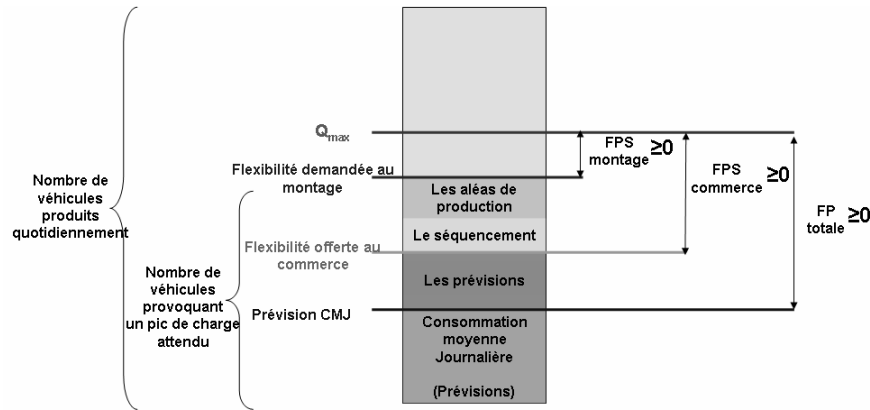


Figure 6. Un poste de travail sur dimensionné

Cette classification permet d’identifier les postes de travail à adapter en priorité comme les postes de travail sous dimensionnés ou insuffisamment dimensionnés. Dans la partie qui suit, nous appliquerons cette classification à un cas industriel et nous montrerons l’intérêt de notre classification en nous basant sur le résultat de l’ordonnancement des véhicules d’un cas industriel.

6. APPLICATION A UN CAS INDUSTRIEL

En collaboration avec le responsable de l’équilibrage du site de production de Sevel Nord au mois de Mai 2006, nous avons étudié le dimensionnement des postes de travail de la ligne d’assemblage en utilisant les indicateurs que nous venons de présenter. Puis, en fonction des véhicules produits le 24 Mai 2006, nous avons comparé le dimensionnement des postes de travail et le nombre d’interventions des opérateurs polyvalents (Lesert, 2006).

Au mois de Mai 2006, la ligne principale d’assemblage de Sevel Nord comptait 212 postes dont 194 avec au moins un véhicule provoquant un pic de charge. Pour chacun de ces postes de travail, nous avons évalué la valeur des 3 indicateurs de flexibilité potentielle supplémentaire et nous avons classé les postes de travail selon leur dimensionnement.

Le résultat obtenu est décrit dans le tableau 2. La colonne « Classe » correspond à la classification que nous avons proposée ci-dessus. La ligne « SOUS » correspond aux postes de travail sous dimensionnés, « INSUFFISANT » correspond aux postes de travail insuffisamment dimensionnés pour la flexibilité offerte au commerce, « RISQUE » correspond aux postes de travail présentant un risque de ne pas absorber les aléas et les difficultés de séquençement et « SUR » correspond aux postes de travail sur dimensionnés.

	Nombre de postes	Pourcentage de postes	Nombre d'interventions	Pourcentage d'interventions
SOUS	68	35,00%	1041	93,00%
INSUFFISANT	17	8,80%	33	2,90%
RISQUE	9	4,60%	7	0,60%
SUR	100	51,60%	38	3,40%
	194		1119	

Tableau 2. Comparaison entre la classification des postes et le nombre d’interventions

Environ la moitié des postes de travail sont mal dimensionnés (« SOUS », « INSUFFISANT » et « RISQUE »). Les interventions se concentrent à 93% sur les 35% de postes de travail sous dimensionnés. Selon le responsable de l’équilibrage du site de Sevel Nord, ces résultats sont confirmés partiellement par ses observations. Pour quelques postes de travail, nous avons grâce à cette classification mis en évidence des erreurs dans le système d’informations de l’entreprise. Ils montrent aussi le travail qui doit encore être réalisé pour parvenir à un équilibrage qui assurera un

ordonnancement de bonne qualité pour les opérateurs. La réduction du nombre de postes de travail mal dimensionnés devrait donc permettre de réduire le nombre d’interventions d’opérateurs polyvalents.

La gestion de la production sur une ligne d’assemblage automobile s’appuie sur deux étapes successives : l’équilibrage des postes de travail et l’ordonnancement des véhicules. Le classement que nous proposons peut intervenir durant ces deux phases.

Lors de l'équilibrage, les responsables de l'équilibrage de la ligne d'assemblage peuvent l'utiliser pour valider la répartition des tâches en vérifiant que les postes de travail peuvent produire au moins la flexibilité offerte au commerce (postes présentant un risque de non absorption des aléas et postes sur dimensionnés). Pour les autres postes de travail, une étude peut être diligentée pour évaluer les surcoûts liés au manque de flexibilité, et ainsi les aider à identifier la nature des modifications à apporter à l'équilibrage en cours pour réduire ces coûts. Lors de l'ordonnancement, ce classement peut également intervenir pour identifier quotidiennement, en début de journée, les postes qui seraient insuffisamment dimensionnés par rapport aux volumes de production prévus pour la journée. Cette analyse peut constituer un outil d'aide à la décision concernant l'anticipation des difficultés et ainsi pourrait aider les équilibreur à affecter le personnel nécessaire aux postes susceptibles de ne pas pouvoir assumer correctement la charge de travail.

7. CONCLUSION

Dans cet article, nous proposons une classification de la flexibilité des postes de travail d'une ligne d'assemblage dans une usine terminale automobile pertinente avec les observations du terrain. Cette classification contribue, d'une part, à identifier les postes de travail à adapter lors d'un équilibrage mensuel et, d'autre part, à mesurer immédiatement l'impact de la modification d'un équilibrage sur la flexibilité des différents postes de travail. Pour un équilibrage donné, elle permet d'évaluer le volume maximal supportable par les postes de travail et la flexibilité supplémentaire disponible. Ceci peut être utilisée pour évaluer différents scénarios de plan de production et permettre aux responsables d'équilibrage et de la ligne d'assemblage de trouver un compromis entre le volume à produire et les moyens à mettre en place pour réaliser la production.

Pour le groupe PSA Peugeot Citroën, cette classification constitue un premier pas vers une optimisation du dimensionnement de leur moyen de production. Toutefois, nous pensons que la méthode peut être appliquée chez d'autres constructeurs automobiles. Le fonctionnement global de la ligne de montage décrit est classique dans le secteur. Même si le calcul du volume maximal utilisé dans la classification peut varier selon la gestion des surcharges (e.g. arrêt de ligne – méthode ANDON- Toyota), le calcul des flexibilités supplémentaires reste assez général.

REFERENCES

Billaut J.C, Moukrim A., Sanlaville E, 2005. « *Flexibilité et robustesse en ordonnancement* », Hermes science, ISBN 2-7462-1028-2
 Boutevin, C., 2003. « *Problèmes d'ordonnancement et d'affectation avec contraintes de ressources de type*

RCPSP et line balancing », Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal à Clermont Ferrand, soutenue le 12/12/2003.
 Corrêa, H.L., 1994a. « *Linking flexibility, uncertainty and variability in Manufacturing Systems* », Ashgate Publishing Company, England
 Corrêa, H.L., 1994b. « *The flexibility of technological and Human Resources in automotive manufacturing* », Integrated Manufacturing system, Vol 5, n°1, 1994, p30-40
 Erol, M., 1999. « *Prise en compte de la flexibilité dans la planification dynamique* », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, soutenue le 28/10/1999
 Ferioli, M., 2006. « *Mesure de la flexibilité de l'atelier montage* », Master Recherche, Management Stratégique et Génie des Organisation, Institut National Polytechnique, Grenoble
 Giard V., Jeunet J., 2006. « *Modélisation du problème général d'ordonnancement de véhicules sur un ligne de production et d'assemblage* », Anale du LAMSADE et Soumission au Journal Européen des Systèmes Automatisés en 2006
 Lesert, A., 2006. « *Sur l'évaluation de la flexibilité de l'atelier montage d'une usine terminale automobile* », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, soutenue le 18/12/2006.
 Lesert A., Alpan G., Frein Y., Noiré S., 2006. « *Outil d'aide à l'analyse des interactions de contraintes pour l'ordonnancement d'une ligne de montage* », 6^{ème} Conférence Francophone de MODélisation et SIMulation, MOSIM'06, 3-5 Avril 2006, Rabat (Maroc)
 Lesert A., Alpan G., Frein Y., Noiré S., 2007. « *Sur le choix des contraintes d'espacement pour l'ordonnancement des véhicules dans une usine terminale* », 7^{ème} Congrès international de génie industriel, CIGI'07, 5-8 Juin 2007, Trois-rivières (Québec)
 Parker, R., Wirth, A., 1999. « *Manufacturing flexibility : measures and relationships* », European Journal of Operational Research, 118, p429-449.