

INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE

N° attribué par la bibliothèque

□□□□□□□□□□□□□□□□

T H E S E

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'INPG

Spécialité : Génie Industriel

préparée au laboratoire Gestion Industrielle Logistique et Conception
dans le cadre de l'Ecole Doctorale Organisation Industrielle et Systèmes de Production

présentée et soutenue publiquement

par

Aymeric LESERT

Le 18/12/2006

Sur l'évaluation de la flexibilité de l'atelier montage d'une usine terminale automobile

—————
Directeurs de thèse : M. Yannick FREIN et Mme Gülgün ALPAN

—————
JURY

M. Bernard Grabot	Président
M. Eric Sanlaville	Rapporteur
M. Alexandre Dolgui	Rapporteur
M. Yannick Frein	Directeur de thèse
Mme. Gülgün Alpan	Directeur de thèse
M. Stéphane Noiré	Examineur
M. Vincent Bernier	Examineur

Thèse confidentielle

*A mon parrain,
Autodidacte convaincu ...*

Remerciements

Cette thèse s'est déroulée dans le cadre d'une convention CIFRE entre le groupe PSA-Peugeot-Citroën et le laboratoire GILCO (Gestion Industrielle Logistique et COncption).

Je tiens tout d'abord à exprimer toute ma reconnaissance et tout mon respect à M. Yannick Frein et à Mme Gülgün Alpan pour avoir dirigé ces travaux, pour leur disponibilité, pour leurs conseils et pour tout ce qu'ils m'ont appris durant ces trois années de thèse.

Je remercie M. Henri Lem pour m'avoir accueilli dans son service avance de phase des systèmes d'information liés à la fabrication (APST), pour son soutien et ses conseils avisés.

J'ai eu le plaisir d'être encadré par M. Stéphane Noiré, M. Vincent Bernier et M. Alexandre Joly. Je leur suis extrêmement reconnaissant pour tout ce qu'ils m'ont apportés durant ces trois années de thèse.

Je remercie tout particulièrement M. Bernard Grabot, M. Alexandre Dolgui et M. Eric Sanlaville pour m'avoir fait l'honneur de bien vouloir expertiser ce travail et pour la pertinence de leurs remarques.

Je tiens également à remercier M. François-Régis Vienot, M. Sylvain Thomas, M. Marcelo Ferioli et M. Radwan El Hadj Khalaf pour avoir participé à ce travail dans le cadre de leur projet de fin d'étude.

Je suis particulièrement reconnaissant à M. Alexandre Villeminot, Mlle. Marie Plasse, M. Adrien Lauer, M. Fabien Petitjean, M. Emmanuel Muhl et M. Damien Gauthier pour leur bonne humeur, leurs conseils et leur sympathie.

Je suis très honoré de la confiance qui m'a été faite au cours de cette étude par les hommes et les femmes de terrain qui oeuvrent quotidiennement au bon fonctionnement des usines terminales et qui ont su partager leurs connaissances. Je tiens à remercier particulièrement M. Romuald Déré pour le temps qu'il nous a su nous accorder et pour l'excellent accueil qu'il a réservé aux différents étudiants ayant participé à cette étude. Je remercie également mes parents, M. et Mme Jacques et Catherine Lesert, pour leur disponibilité, pour les visites qu'ils ont organisées au travers de l'atelier montage de Sochaux et pour le partage de leur expérience du terrain.

Je n'oublie pas les membres du laboratoire GILCO, les membres de l'équipe APST, et toutes les personnes que j'ai côtoyées et qui ont contribué de près ou de loin à ces travaux.

Enfin, pour leur soutien moral et leur écoute, je remercie également toute ma famille, tous mes amis et tous ceux qui n'ont pas été cités mais qui ont joué un rôle petit ou grand dans ces travaux.

Table des matières

INTRODUCTION	11
1. LE SYSTEME DE PRODUCTION DANS UNE USINE TERMINALE AUTOMOBILE..	17
1.1. L'INDUSTRIE AUTOMOBILE.....	19
1.1.1. EVOLUTION DE LA PRODUCTION.....	19
1.1.2. DE LA COMMANDE A LA LIVRAISON	20
1.1.3. LE FLUX VEHICULE.....	21
1.2. L'EQUILIBRAGE DE L'ATELIER MONTAGE.....	25
1.2.1. ORGANISATION DE L'ATELIER MONTAGE	25
1.2.2. UN POSTE DE TRAVAIL.....	26
1.2.3. LA PROBLEMATIQUE DE L'EQUILIBRAGE	27
1.2.4. L'EQUILIBRAGE DES POSTES DE TRAVAIL	30
1.3. LE SEQUENCMENT DES VEHICULES	35
1.3.1. LES CRITERES A OPTIMISER	35
1.3.2. LA RESOLUTION DU PROBLEME DE SEQUENCMENT	40
1.4. LA FLEXIBILITE	42
1.4.1. GENERALITES.....	42
1.4.2. LA FLEXIBILITE EN ORDONNANCEMENT DES VEHICULES	44
1.5. L'ENJEU ET L'OBJECTIF DE LA THESE.....	48
1.5.1. UN ENJEU ECONOMIQUE	48
1.5.2. OBJECTIF DE LA THESE	49
1.5.3. POSITIONNEMENT DES TRAVAUX.....	50
1.5.4. PLAN DE LA THESE	51
2. ANALYSE DE L'EXISTANT	53
2.1. LA FIABILITE DES DONNEES PREVISIONNELLES.....	55
2.1.1. LES DONNEES DE L'ANALYSE STATISTIQUE	55
2.1.2. LA FIABILITE DES CONTRAINTES D'ESPACEMENT.....	58
2.1.3. LE RESPECT DES MARGES DE SECURISATION.....	62
2.1.4. CONCLUSION	64
2.2. LA QUALITE DES SEQUENCES DE VEHICULES	65
2.2.1. LA COORDINATION DE PRODUCTION	65
2.2.2. L'ATELIER MONTAGE	66
2.2.3. LES INCOHERENCES.....	68
2.3. L'EQUILIBRAGE D'UNE LIGNE D'ASSEMBLAGE CHEZ PSA.....	72
2.3.1. LE DIMENSIONNEMENT HUMAIN DE L'ATELIER MONTAGE	73
2.3.2. LA NEGOCIATION DES CONTRAINTES D'ESPACEMENT	74
2.3.3. LES CARENCES DU PROCESSUS	80

2.4.	CONCLUSION	81
3.	DEFINITION DES CONTRAINTES D'ESPACEMENT.....	83
3.1.	MODELISATION D'UN OPERATEUR EN DIFFICULTE	85
3.1.1.	LES DONNEES	86
3.1.2.	LES HYPOTHESES.....	88
3.1.3.	LA MODELISATION SPELEO-1.....	88
3.1.4.	LES APPROCHES DE LA LITTERATURE	92
3.1.5.	LA MODELISATION SPELEO-2.....	93
3.1.6.	SYNTHESE	95
3.1.7.	RESULTATS NUMERIQUES.....	95
3.1.8.	CONCLUSION	96
3.2.	DEFINITION DU CRITERE D'UNE CONTRAINTE D'ESPACEMENT.....	97
3.2.1.	CARACTERISATION DE LA RELATION ENTRE UN POSTE DE TRAVAIL ET UNE CONTRAINTES D'ESPACEMENT	98
3.2.2.	HIERARCHISATION DES RELATIONS	102
3.2.3.	CARACTERISATION D'UN POSTE DE TRAVAIL.....	104
3.2.4.	MATRICE COLOREE DES RELATIONS	104
3.2.5.	CAS D'APPLICATION : SEVEL NORD – MAI 2006	105
3.3.	DEFINITION DU RATIO D'UNE CONTRAINTE D'ESPACEMENT	107
3.3.1.	SIMPLIFICATION DU PROBLEME	107
3.3.2.	CALCUL DU RATIO D'UN POSTE DE TRAVAIL.....	108
3.3.3.	CALCUL D'UN RATIO POUR UNE CONTRAINTE D'ESPACEMENT	114
3.3.4.	INDICATEUR DE NON RESPECT D'UNE CONTRAINTE D'ESPACEMENT	116
3.4.	RESULTATS NUMERIQUES.....	117
3.4.1.	UNE CONTRAINTE D'ESPACEMENT PAR POSTE	118
3.4.2.	COMPARAISON DE DEUX JEUX DE CONTRAINTES D'ESPACEMENT	121
3.5.	CONCLUSION	126
4.	LES INTERACTIONS DE CONTRAINTES	129
4.1.	CARACTERISATION DES INTERACTIONS DE CONTRAINTES	131
4.1.1.	LES OPTIONS EXCLUSIVES	132
4.1.2.	LES OPTIONS FORTEMENT CROISEES	132
4.1.3.	UNE LISTE IDEALE	133
4.1.4.	SYNTHESE	133
4.2.	ETAT DE L'ART	134
4.2.1.	L'INDICATEUR DE DIFFICULTE A RESPECTER UN RATIO.....	134
4.2.2.	L'INDICATEUR DE DIFFICULTE A RESPECTER DEUX RATIOS.....	135
4.3.	DEFINITIONS.....	136
4.3.1.	UN PROGRAMME DE PRODUCTION	136
4.3.2.	NOMBRE DE NON RESPECTS D'UNE CONTRAINTE D'ESPACEMENT	136
4.3.3.	MOTIF ET ENSEMBLE DES MOTIFS D'UN RATIO	137

4.3.4.	RATIO COMPATIBLE ET ENSEMBLE DES RATIOS COMPATIBLES D'UNE CONTRAINTE D'ESPACEMENT.....	138
4.3.5.	RATIO COMPATIBLE APPLICABLE ET ENSEMBLE DES RATIOS COMPATIBLES APPLICABLES D'UNE CONTRAINTE D'ESPACEMENT	140
4.3.6.	ENSEMBLE DES MOTIFS D'UNE CONTRAINTE D'ESPACEMENT	141
4.3.7.	MOTIF ELEMENTAIRE, LISTE IDEALE ET ENSEMBLE DES LISTES IDEALES.....	142
4.4.	MODELISATION DES INTERACTIONS DE CONTRAINTES.....	144
4.4.1.	PROPRIETES.....	144
4.4.2.	CONJECTURE	146
4.4.3.	AU PLUS PROCHE D'UNE LISTE IDEALE (PPLI).....	147
4.5.	RESULTATS NUMERIQUES.....	151
4.5.1.	CONSTRUCTION DES COURBES.....	151
4.5.2.	DES COURBES CARACTERISTIQUES	151
4.5.3.	IMPACT DE LA FLEXIBILITE SUR LES COURBES	154
4.6.	OUTIL D'AIDE A L'ANALYSE DES INTERACTIONS DE CONTRAINTES	155
4.6.1.	OUTIL D'AIDE A L'ANALYSE.....	156
4.6.2.	CHOIX DES CONTRAINTES A AJUSTER	157
4.6.3.	L'AJUSTEMENT DES RATIOS AU PROGRAMME DE PRODUCTION.....	158
4.6.4.	EXEMPLE D'UTILISATION	159
4.7.	CONCLUSION.....	161
5.	LA MESURE DE LA FLEXIBILITE	163
5.1.	MESURE DE LA FLEXIBILITE.....	165
5.1.1.	ETAT DE L'ART.....	166
5.1.2.	EVALUATION DE LA CAPACITE MAXIMALE DE PRODUCTION	168
5.1.3.	LES INDICATEURS DE FLEXIBILITE	173
5.1.4.	CLASSIFICATION DES POSTES DE TRAVAIL	175
5.1.5.	APPLICATION A UN CAS INDUSTRIEL.....	177
5.2.	HARMONISATION DU PROCESSUS DE NEGOCIATION.....	180
5.2.1.	EVOLUTION DU ROLE DES PROTAGONISTES	180
5.2.2.	EVOLUTION DE LA PREPARATION	181
5.2.3.	EVOLUTION DE LA NEGOCIATION DES CONTRAINTES.....	182
5.2.4.	EVOLUTION DE L'EXECUTION	185
5.2.5.	EVOLUTION DE L'ANIMATION.....	185
5.3.	CONCLUSION.....	186
	CONCLUSION ET PERSPECTIVES	189
	BIBLIOGRAPHIE.....	195
	ANNEXES.....	203
	ANNEXE A - INDICATEUR DE NON RESPECTS D'UNE CONTRAINTE D'ESPACEMENT	205
	ANNEXE B - MODELE ANALYTIQUE DE LA STRATEGIE PPME	208

ANNEXE C - DEMONSTRATION DES PROPRIETES DE L'ABSENCE DE NON RESPECTS.....	214
ANNEXE D - DEMONSTRATION DE LA PRESENCE D'AU PLUS UN VEHICULE DANS UN MOTIF ELEMENTAIRE.....	219
ANNEXE E – VERIFICATION DE LA CONJECTURE PAR RAPPORT AUX TROIS PROPRIETES DE L'ABSENCE DE NON RESPECTS	221
ANNEXE F – PPLI - TRAITEMENT DES QUANTITES EXCEDENTAIRES.....	223
ANNEXE G – DESCRIPTION DES DIFFERENTS SOUS PROBLEMES DE SEQUENCEMENT.....	226
ANNEXE H – PPLI – REINTEGRATION DES QUANTITES EXCEDENTAIRES	232
TABLEAUX.....	233
FIGURES.....	235

Introduction

Depuis une vingtaine d'années, l'industrie automobile est soumise à une concurrence de plus en plus acerbé qui renverse le rapport entre l'offre et la demande et qui incite certains constructeurs à offrir une plus grande variété de véhicules (dont les constructeurs français PSA Peugeot Citroën et Renault). Ce travail a été effectué en collaboration avec le constructeur automobile PSA Peugeot Citroën pour améliorer et pour harmoniser l'organisation des moyens de production des différentes usines terminales dans le cadre de cette politique.

Le passage de la notion d'économie d'échelle à une économie de variété bouleverse l'organisation et la gestion des moyens industriels. Pour satisfaire les attentes des clients, ce passage implique une bonne maîtrise du processus de fabrication qui s'obtient en partie en agissant sur deux niveaux de libertés (Okamura et al., 1979) :

- L'équilibrage consiste à définir les effectifs et à répartir les tâches de la gamme de fabrication sur les différents postes de travail.
- L'ordonnancement des véhicules consiste à déterminer l'ordre des véhicules à engager dans les ateliers en respectant au mieux les contraintes des différents métiers.

La fabrication d'un véhicule sur une ligne d'assemblage automobile nécessite des milliers d'opérations. L'équilibrage consiste à affecter ces opérations aux postes de travail tel que la charge de travail sur chacun d'eux soit la plus homogène possible. Cette affectation des tâches, un traitement long et coûteux, est étudiée périodiquement à partir de données prévisionnelles (Boutevin, 2003). Cependant, 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 (temps entre deux véhicules). 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. Cet espacement est garanti au cours de l'ordonnancement grâce au respect d'une contrainte d'espacement. Et, le nombre de ces véhicules doit être limité pour que l'ordonnancement des véhicules puisse garantir ce respect.

L'équilibrage de la ligne d'assemblage est réalisé en fonction des données prévisionnelles transmises par la direction commerciale. Or, les données prévisionnelles comportent des erreurs. Puis, lors du séquençage des véhicules commandés par les clients,

une fois par jour, nous avons constaté que les contraintes d'espace ne sont pas toujours faciles à respecter. 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 dans notre travail, il est naturel d'envisager de la flexibilité pour absorber :

- les erreurs de prévisions,
- les difficultés de séquençage 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. L'objectif de cette thèse est d'évaluer la flexibilité présente dans l'équilibrage d'une ligne d'assemblage afin d'aider les décideurs à trouver le meilleur compromis entre différents niveaux de flexibilité.

En pratique, pour assurer une bonne organisation de l'atelier montage dans chaque usine terminale, une réunion est organisée entre les représentants locaux de la direction commerciale et les représentants locaux de la ligne d'assemblage. Cette réunion consiste à négocier les contraintes d'espace d'un mois sur l'autre et la flexibilité à appliquer à la ligne d'assemblage. Cette réunion est précédée d'une étape de préparation pour chacun des protagonistes s'appuyant sur l'expérience, l'équilibrage de la ligne de production, les capacités maximales et les quantités prévisionnelles. A l'issue de la négociation, l'outil industriel doit être adapté pour respecter les engagements pris. Ces différentes phases constituent le « processus de négociation ». Or, lors de l'étude terrain, nous avons constaté une absence d'outils et de méthodes permettant aux protagonistes d'argumenter leurs décisions. D'ailleurs, les pratiques sont très différentes selon les sites de production. De plus, nous avons noté, dans la littérature, un manque de travail sur cet aspect.

Dans le premier chapitre, nous présentons le contexte automobile et nous précisons notre problématique en décrivant l'équilibrage d'une ligne d'assemblage, l'ordonnancement des véhicules et la flexibilité des entreprises manufacturières.

Nous consacrons le deuxième chapitre à l'analyse de l'existant. Nous décrivons le processus de négociation des contraintes entre les représentants de la direction commerciale et les représentants de la ligne d'assemblage. Nous mesurons la fiabilité des données prévisionnelles. Puis, nous étudions la cohérence entre le respect des contraintes d'espacement négociées et les surcharges de travail ayant déclenché l'aide d'un opérateur polyvalent. En conclusion, nous nous sommes rendus compte que la flexibilité nécessaire pour le séquençement était mal identifiée et mal évaluée. Ces études nous ont permis de dégager trois axes d'amélioration du coût de la réponse industrielle à la direction commerciale: la définition des contraintes d'espacement, l'anticipation de la difficulté à respecter les contraintes d'espacement et l'évaluation de la capacité maximale de production des contraintes d'espacement. Nous développerons ces trois points dans les chapitres suivants.

En premier lieu, dans le chapitre trois, nous nous intéressons à la définition des contraintes d'espacement à partir du résultat de l'équilibrage de la ligne d'assemblage. Afin d'évaluer, dans un premier temps, le besoin de renforcer ponctuellement un poste de travail avec un opérateur polyvalent, nous modélisons un opérateur en difficulté. Puis, dans un deuxième temps, nous présentons une définition mathématique de chacune des composantes d'une contrainte d'espacement qui, si elle est respectée, permet d'éviter le renforcement des postes de travail dû à une succession de véhicules inappropriée. Ces définitions aboutissent à quelques préconisations pour un équilibrage prenant en compte le problème de l'ordonnancement des véhicules.

Dans le quatrième chapitre, nous proposons des indicateurs pour évaluer *a priori* la difficulté à respecter les contraintes d'espacement données. Nous nous attacherons à présenter le modèle d'un phénomène nouvellement identifié qui perturbe le respect des contraintes d'espacement dans l'ordonnancement des véhicules : « les interactions de contraintes ». Cette modélisation a abouti à la description d'un outil d'aide à l'analyse des interactions de contraintes qui identifie les couples de contraintes d'espacement difficile à respecter simultanément. Cette identification permet d'identifier les actions à mener pour mieux adapter la ligne d'assemblage à la demande commerciale.

Enfin, le chapitre cinq concerne l'évaluation de la capacité maximale de production et la mesure de la flexibilité d'une ligne d'assemblage. La mesure de la flexibilité permet de cibler les postes de travail à adapter en priorité pour absorber le plus sereinement possible les

données prévisionnelles. Cette mesure évalue l'écart entre la capacité maximale de production dépendante de l'équilibrage défini par les équilibreurs et la capacité de production prévisionnelle. En comparant cet écart avec différents niveaux de flexibilité demandés, nous avons élaboré une classification des postes de travail qui permet de choisir les postes de travail à adapter en priorité. Pour conclure, nous proposons une évolution du processus de négociation des contraintes d'espacement pour harmoniser les modes de fonctionnement et pour permettre d'assurer la flexibilité demandée au plus juste.

1. Le système de production dans une usine terminale automobile

Les travaux décrits dans ce document concernent la gestion du séquençement du flux de production dans une usine terminale automobile. Ils ont été effectués en collaboration avec l'entreprise PSA Peugeot Citroën. Ce premier chapitre présente d'abord un bref historique de l'industrie automobile, puis décrit le contexte des travaux de recherche, c'est-à-dire, l'équilibrage d'une ligne d'assemblage automobile, le séquençement des véhicules et le besoin de flexibilité de l'atelier montage. Nos travaux portent sur la flexibilité qui doit être intégrée aux contraintes issues de l'équilibrage et appliquées au séquençement des véhicules. Par la suite, les enjeux et les objectifs de la thèse sont expliqués. Enfin, la dernière partie de ce chapitre positionne les travaux de recherche et fournit le plan de la thèse.

1.1. L'INDUSTRIE AUTOMOBILE

1.1.1. EVOLUTION DE LA PRODUCTION

Depuis la fin du XIX^e siècle, l'industrie automobile a considérablement évolué. D'abord réservée à une élite, l'automobile était fabriquée de manière artisanale. En 1911, Frederick W. Taylor, dans un essai intitulé « Scientific management » (Taylor, 1911), décrit les moyens d'accroître le rendement. Pour atteindre une productivité maximale, l'entreprise doit méthodiquement organiser le travail de ses employés, minuter leurs gestes, décomposer les tâches et déterminer les rémunérations en fonction des résultats.

Henry Ford, appliquant les méthodes de Taylor, provoque une première révolution en démocratisant la voiture avec la Ford modèle T. Grâce à la fabrication en grande série, il a réduit les coûts et a permis à l'industrie automobile de prendre une part de plus en plus importante dans notre économie. La concurrence accrue entre les constructeurs automobiles a contraint les entreprises à proposer, dans un premier temps, une plus grande variété de produits. Puis, dans un deuxième temps, elles ont dû adapter progressivement la production aux demandes des clients.

Aujourd'hui, pour conquérir de nouveaux marchés et pour répondre au mieux aux attentes des clients en terme de délai, de coût et de qualité, les constructeurs automobiles misent sur un renouvellement rapide de leur gamme. Le groupe PSA Peugeot Citroën s'est engagé dans cette voie dès le début des années 2000. Un renouvellement rapide nécessite une réduction de la période d'étude, des moyens de production adaptables à de nouveaux produits et réactifs face aux variations commerciales. Pour atteindre cet objectif, les voitures sont conçues sur le principe des plateformes, *i.e.*, les véhicules d'un même gabarit (petite,

moyenne ou grande) reposent sur une base véhicule commune (éléments fonctionnels¹ non perçus par le client).

Pour PSA Peugeot Citroën, cette politique de plate-forme a initialisé une réflexion globale caractérisée par le projet Convergence en 2001. Ce projet est un plan industriel interne destiné à faire converger tous les sites de production du groupe vers les meilleures pratiques mondiales (internes et externes) en matière de production (savoir-faire, techniques, modes de fonctionnement...). Tous les domaines de production sont concernés, et en particulier, le dimensionnement des usines terminales automobiles.

1.1.2. DE LA COMMANDE A LA LIVRAISON

La chaîne logistique mise en place chez PSA est une organisation en flux tendus et tirés par le client. Ce mode de fonctionnement tend à répondre aux exigences du client en lui offrant la possibilité de personnaliser son véhicule et en lui garantissant un délai raisonnable. Le délai moyen d'attente est d'environ 25 jours après l'enregistrement de la commande d'un client.

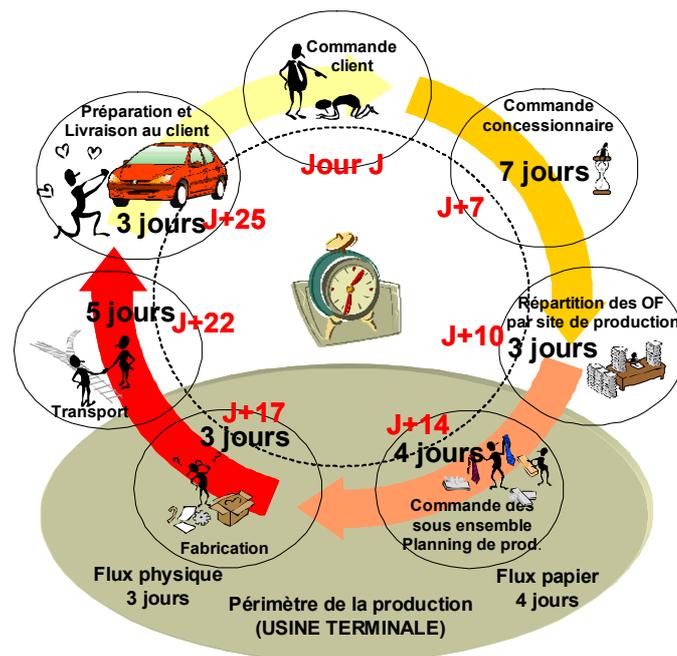


Figure 1.1 : 25 jours : de la commande à la livraison

La figure 1.1 représente le cycle de la commande à la livraison. Les commandes sont enregistrées dans le système d'information de l'entreprise par les succursales, les concessionnaires ou les agents PSA. Les commandes, préalablement transformées en ordre de fabrication (OF), sont centralisées, puis réparties entre les différentes usines terminales en

¹ Châssis, moteur, transmission, liaisons au sol, ...

fonction de leurs capacités et spécificités respectives. Les ordres de fabrication sont ensuite ordonnancés pour synchroniser l’approvisionnement des pièces en bord de ligne avec l’engagement des véhicules sur la ligne de production. Cette synchronisation réduit la taille des stocks de composants et fiabilise le respect du délai client (Bernier, 2000). Pour terminer, le véhicule passe par le réseau de distribution pour être livré au client.

1.1.3. LE FLUX VEHICULE

Le flux véhicule dans une usine terminale automobile (Figure 1.2) est composé de 3 flux appelés : « flux papier », « flux constituant » et « flux principal ». Le flux papier correspond aux ordres de fabrication transmis quotidiennement par les services centraux. Le flux constituant représente la chaîne logistique entre l’usine terminale automobile et les fournisseurs. Le flux principal transforme un ordre de fabrication en une voiture prête à livrer aux clients dans une usine terminale.

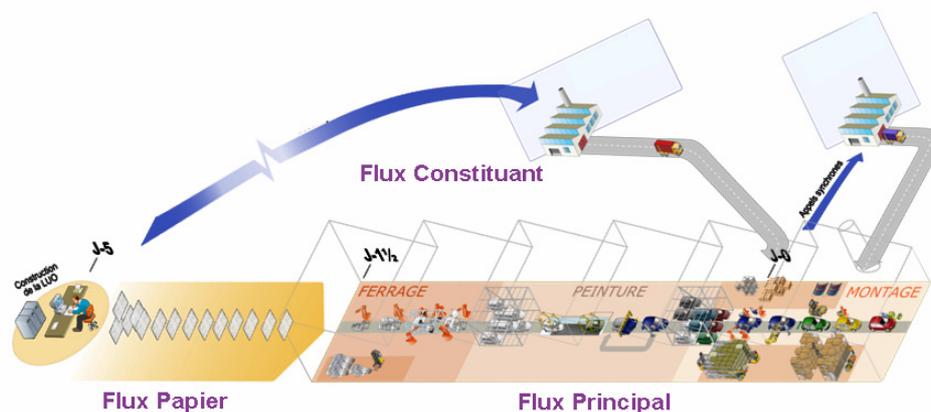


Figure 1.2 : Le flux véhicule dans une usine terminale automobile

1.1.3.1. LE FLUX PAPIER

Les commandes fermes ou ordres de fabrication sont transmis quotidiennement par les services centraux en tenant compte des capacités de production des différentes usines terminales. Les ordres de fabrication sont ordonnancés en une liste appelée Liste Unique Ordonnée (L.U.O.). Cette liste est construite jour après jour en respectant au mieux les contraintes industrielles du flux principal. Pour assurer une bonne synchronisation avec l’approvisionnement des fournisseurs, les quantités commandées aux fournisseurs par l’usine terminale sont réalisées en fonction de cette liste 5 jours avant l’engagement des véhicules sur la ligne de montage (J-5 pour J-0 sur la figure 1.2).

Comme elle sert de référence, elle doit être respectée le plus possible à l’intérieur de l’usine, *i.e.* le long du flux principal.

1.1.3.2. LE FLUX CONSTITUANT

La fabrication d'un véhicule nécessite l'assemblage de milliers de composants (de 3000 à 4000 suivant le type de véhicule). Comme les usines produisent plusieurs centaines de véhicules par jour, la gestion des approvisionnements et des stocks représente un enjeu économique extrêmement important pour l'entreprise. Bollon (2001) présente de manière détaillée les différents mécanismes de pilotage des systèmes de production et des flux d'approvisionnement. Ces mécanismes reposent sur 2 principes : le flux tiré (consommation réelle) et le flux poussé (consommation prévisionnelle).

Les usines du groupe PSA Peugeot Citroën fonctionnent en flux tirés et utilisent deux modes d'approvisionnement : l'ordre RECOR (REnouvellement de la COnsommation Réelle) et l'ordre coordonné. Ces systèmes d'ordre, appliqués chez PSA Peugeot Citroën, largement décrits par Villeminot (2003), ont été modélisés et intégrés dans un outil de simulation d'approvisionnement (SimAppro).

1.1.3.2.1. L'ORDRE RECOR

L'ordre RECOR consiste à déclencher une commande à chaque consommation d'une unité de conditionnement. Ce système d'ordre est dérivé du KANBAN (Shingo, 1988), un des principes du flux tiré. Ce système d'ordre concerne en général les pièces couramment utilisées et peu encombrantes à stocker (écrous, vis, ...). Il représente environ 15% des références commandées.

1.1.3.2.2. L'ORDRE COORDONNE

L'ordre coordonné s'effectue en fonction d'une consommation future représentée, dans notre cas, par les commandes décrites dans la LUO. Il est destiné aux pièces spécifiques ou très encombrantes (sièges, roues, toits de coupé cabriolet, tableaux de bord, ...). Ce système d'ordre se décline en deux approches qui dépendent du moment de l'appel : le coordonné synchrone et le coordonné par anticipation.

Dans le premier cas, l'appel est déclenché à l'arrivée du véhicule sur la ligne montage. Le système d'information du groupe PSA Peugeot Citroën transmet directement la commande et la date et l'heure de livraison au fournisseur. Celui-ci assemble la pièce et l'envoi par camion à l'usine terminale dans l'ordre du flux principal. Ce système fonctionne pour des fournisseurs situés à proximité immédiate de l'entreprise. Dans le deuxième cas, l'appel est déclenché quelques jours avant afin de laisser le temps aux fournisseurs de préparer les pièces et de les livrer à une date prévue.

1.1.3.3. LE FLUX PRINCIPAL

Le flux principal est constitué d'une succession de trois ateliers : Ferrage, Peinture et Montage (Figure 1.3). L'atelier ferrage soude les pièces métalliques découpées et mises en formes par l'atelier d'emboutissage. L'atelier peinture protège et peint la caisse soudée. L'atelier montage assemble les éléments fonctionnels du véhicule.



Figure 1.3 : L'usine terminale automobile de Poissy

1.1.3.3.1. L'ATELIER EMBOUTISSAGE

Cet atelier prépare les pièces métalliques qui devront être assemblées sur un véhicule pour construire son armature, sa carrosserie et son châssis. Il transforme des bobines d'acier de différents tonnages, épaisseurs et largeurs en pièces embouties prêtes à être consommées par l'atelier ferrage.



Cet atelier n'est pas toujours présent sur les sites de production. Par conséquent, les sites disposant d'un atelier emboutissage fabriquent des pièces qui seront utilisées sur d'autres sites de production.

1.1.3.3.2. L'ATELIER FERRAGE

Cet atelier fabrique l'armature à partir des pièces embouties, puis assemble les éléments de la carrosserie (portes, capots, ...). La première partie de l'atelier est fortement automatisée. Il faudra 3000



soudures, réalisées par des robots, pour fabriquer la « caisse en blanc ». La deuxième partie de



l'atelier est moins mécanisée et des opérateurs interviennent pour ajuster les ouvrants. Cet atelier engage les ordres de fabrication dans l'ordre qui a été initialement calculé.

1.1.3.3.3. L'ATELIER PEINTURE

Lorsque l'armature, les portes et le capot du véhicule sont assemblés, le véhicule subit plusieurs traitements à l'atelier peinture : traitement de surfaces (anti-gravillons, anti-corrosion, étanchéité), apprêts, laques et vernis.



Cet atelier, pour faire des économies, doit réaliser des convois de teintes, c'est-à-dire, enchaîner successivement des véhicules ayant la même teinte. En effet, un changement de teinte implique de devoir purger les circuits d'approvisionnement de la peinture et cela représente un coût non négligeable (environ 7 €/véhicules). Néanmoins, ces convois ne peuvent pas excéder une taille maximale. En effet, pour garantir la vigilance des contrôleurs, il est nécessaire de varier les teintes. Et, pour éviter les dépôts dans les systèmes de projection de peinture, il faut purger régulièrement les pistolets.



1.1.3.3.4. L'ATELIER MONTAGE

Cet atelier est le plus complexe et le plus difficile à gérer. Le véhicule prend sa forme définitive et effectue son premier démarrage. Les pièces commandées (tableau de bord, sièges,...) y sont livrées pour être assemblées. Des manipulateurs sont présents pour aider les opérateurs à réaliser



les tâches pénibles. Et, contrairement aux deux précédents ateliers, l'homme y est omniprésent. La qualité de fabrication dépend des mains agiles des opérateurs qui peuvent s'adapter à différentes configurations. Les opérateurs sont également fortement impliqués dans le processus qualité. Chaque étape est soigneusement contrôlée pour réduire les défauts qualité qui pourront mener à une insatisfaction du client. Enfin, à l'extrémité de la ligne d'assemblage, le véhicule démarre et subit une panoplie de contrôles. Puis, il est mis sur parc pour être expédié au client.

Cet atelier doit être dimensionné au mieux afin de minimiser les coûts de main d'œuvre et d'infrastructure. Ce dimensionnement, un traitement long et coûteux, est réalisé périodiquement dans le cadre de l'équilibrage à partir des données prévisionnelles transmises par la direction commerciale. Comme les données prévisionnelles sont incertaines, l'équilibrage doit prendre en compte une certaine flexibilité. Cette flexibilité doit garantir la fabrication des véhicules commandés par les clients sans devoir renforcer ponctuellement les postes (i.e. un opérateur supplémentaire est nécessaire ponctuellement pour effectuer la

tâche). Un poste mal dimensionné entraîne soit un surcoût de production soit une augmentation du délai de production.

1.2. L'EQUILIBRAGE DE L'ATELIER MONTAGE

L'assemblage des véhicules dans l'atelier montage nécessite des milliers de tâches élémentaires réalisées sur des centaines de postes de travail (300 postes pour l'usine de Sevel Nord et 200 postes pour celle de Poissy). L'équilibrage de l'atelier montage consiste à affecter les opérations d'assemblage sur ces postes de travail répartis sur la ligne de fabrication.

Cette opération, complexe et coûteuse, est réalisée périodiquement en exploitant les données prévisionnelles transmises par la direction commerciale. Pour PSA Peugeot Citroën, l'équilibrage de l'ensemble de la ligne de fabrication est étudié deux fois par an et des ajustements sont réalisés ponctuellement, *i.e.* une fois par mois ou lorsqu'une difficulté majeure est identifiée. Notre travail s'organise autour de ces ajustements mensuels.

Après avoir décrit l'organisation de l'atelier montage, puis un poste de travail, nous présenterons le problème de l'équilibrage dans la littérature. Ensuite, nous présenterons les outils et les informations exploités par les équilibreurs pour réaliser l'équilibrage de la ligne principale d'assemblage chez PSA Peugeot Citroën. Ces données seront ultérieurement utilisées pour identifier les postes de travail qu'il est nécessaire de mieux dimensionner.

1.2.1. ORGANISATION DE L'ATELIER MONTAGE

L'atelier montage est organisé autour d'une ou plusieurs lignes principales d'assemblage et comprend des lignes d'assemblage parallèles et des zones de préparation (Figure 1.4).

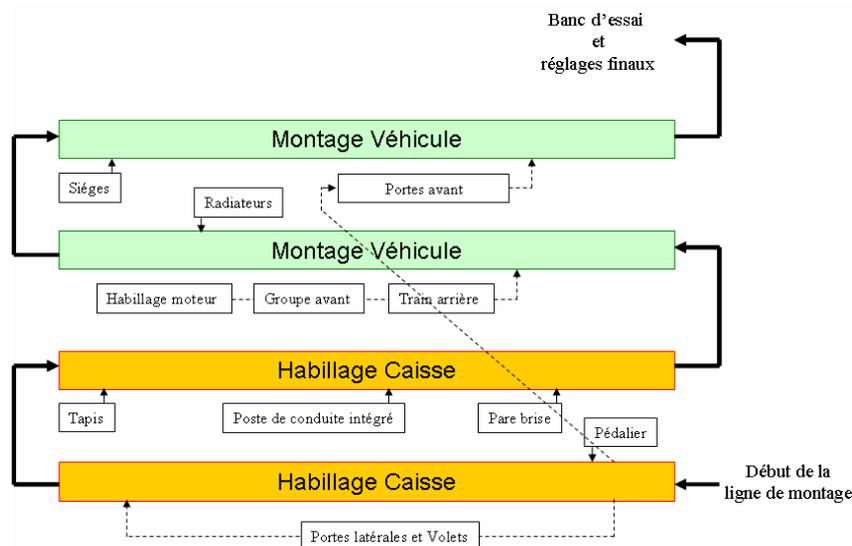


Figure 1.4 : Ligne de montage des ateliers montage

Les lignes d'assemblage parallèles et les zones de préparation permettent aux opérateurs d'assembler des éléments complexes avant l'assemblage final sur le véhicule sur la ligne principale d'assemblage (Sièges, Moteur, Portes, ...). La ligne principale d'assemblage est découpée en deux grands secteurs : Habillage Caisse (Installation des éléments structurels comme les faisceaux, la miroiterie (vitres, pare-brises, ...), le pédalier, le tableau de bord ...) et Montage Véhicule (installation des éléments fonctionnels comme le moteur, les roues, les sièges, ...).

Si l'atelier montage compte plusieurs lignes d'assemblage, en raison de la politique de séparation des flux prônée dans le groupe PSA Peugeot Citroën, les lignes d'assemblage sont indépendantes car les installations ne permettent pas de réaliser des « crossover », *i.e.* un véhicule ne peut pas changer de ligne d'assemblage au cours de son assemblage.

Dans la suite de nos travaux, nous nous intéresserons aux postes de travail de la ligne principale d'assemblage, *i.e.*, Habillage Caisse et Montage Véhicule.

1.2.2. UN POSTE DE TRAVAIL

Une ligne principale d'assemblage est découpée physiquement en pas de travail de longueur identique. Un pas de travail a une longueur correspondant à l'écart entre l'avant de deux véhicules consécutifs. De chaque côté de la ligne principale d'assemblage sont disposées des zones de stockage. Ces zones servent à entreposer les outils fixes ou mobiles et les pièces nécessaires à la réalisation des opérations d'assemblage.

Les opérations d'assemblage sont réparties sur les postes de travail jalonnant la ligne d'assemblage. Un poste de travail situé sur le côté gauche de la voiture est illustré par la figure 1.5. Ce poste de travail est occupé par un opérateur. L'opérateur évolue dans un espace de travail délimité (zone représentée par le rectangle en bleu). Cet espace de travail, qui inclut au moins un pas de travail (trait discontinu en noir), permet à l'opérateur de réaliser ses tâches sans gêner d'autres opérateurs.

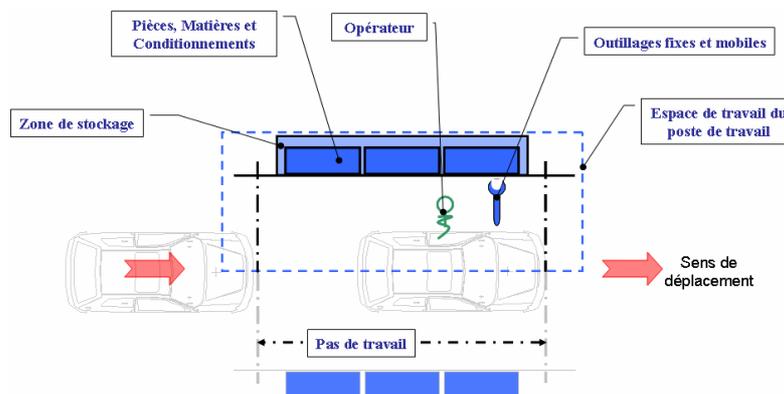


Figure 1.5 : Un poste de travail

Les véhicules avancent en continu et passent donc de poste en poste sans s'arrêter et toujours dans le même ordre. Sur la figure 1.5, ils avancent de gauche à droite. Ils avancent tous à la même vitesse et sont disponibles pour un opérateur durant un même laps de temps, appelé le temps cycle.

Eventuellement, un poste de travail peut compter plusieurs opérateurs. Chaque opérateur traite un véhicule. Le partage des tâches est exclu pour des raisons de qualité (oubli d'une opération, gêne des opérateurs, ...). Par exemple, si un poste compte 2 opérateurs X et Y, l'opérateur X s'occupera des véhicules 1, 3, 5, ... et l'opérateur Y s'occupera des véhicules 2, 4, 6, ... Ils traiteront 1 véhicule sur 2. L'espace de travail du poste de travail pourra alors inclure 2 pas de travail sans perturber les opérateurs travaillant à proximité.

Sur un véhicule, nous pouvons compter jusqu'à 5 opérateurs y travaillant simultanément (un opérateur devant, derrière, à gauche, à droite et à l'intérieur du véhicule).

1.2.3. LA PROBLEMATIQUE DE L'EQUILIBRAGE

Notre document n'a pas l'ambition de réaliser un état de l'art exhaustif du problème d'équilibrage. Pour ceci, on pourra se référer notamment à (Becker et Scholl, 2006), (Boutevin, 2003) et (Dolgui et Proth, 2006). Ce bref rappel a pour objectif d'aborder la complexité du problème d'équilibrage et de l'application des méthodes de résolution dans un environnement industriel.

L'équilibrage de la ligne principale d'assemblage consiste à évaluer le nombre de postes de travail à définir, le nombre d'opérateurs à affecter à chacun des postes et à répartir l'ensemble des opérations élémentaires sur les postes telle que la ligne d'assemblage soit capable de produire les volumes de véhicules demandés par le commerce à un coût de fabrication minimal.

Pour des raisons organisationnelles et techniques, les opérations doivent être réalisées selon un ordre partiel prédéfini décrit par un graphe de précedence. La répartition des opérations sur les différents postes doit donc prendre en compte cet ordre.

L'équilibrage d'une ligne de production est un problème abordé dans la littérature scientifique depuis plus de cinquante ans. Becker et Scholl (2006) classent le problème d'équilibrage en trois familles dépendant du nombre de produits différents à fabriquer et du critère à optimiser : SALBP, MALBP et GALBP. Nous détaillons ci-dessous ces trois familles.

1.2.3.1. SALBP : SIMPLE ASSEMBLY LINE BALANCING PROBLEM

Ce problème d'équilibrage, étudié pour une ligne d'assemblage à modèle unique, s'apparente, dans le domaine automobile, à l'équilibrage d'une ligne de production pour la Ford modèle T. Comme tous les véhicules sont identiques, tous les véhicules produits ont le même temps de traitement pour chaque poste. Pour un poste, l'opérateur répète inlassablement les mêmes opérations sur tous les véhicules.

Ce problème consiste à minimiser le nombre de postes à définir et/ou le temps cycle pour minimiser les coûts unitaires. Minimiser le nombre de postes consiste à minimiser les coûts de main d'œuvre. Et, minimiser le temps cycle revient à maximiser la production. Les méthodes de résolutions décrites dans les états de l'art de Scholl et Becker (2006) et de Boutevin et al. (2003) se décomposent en 3 classes selon le critère à optimiser :

- SALBP-1 minimise le nombre de postes de travail en considérant un temps cycle fixé,
- SALBP-2 minimise le temps cycle en considérant un nombre de postes de travail fixé,
- SALBP-G minimise la somme des temps morts (écart entre le temps cycle et le temps de traitement sur le poste) sans fixer ni le nombre de postes, ni le temps de cycle en trouvant le meilleur compromis entre le nombre de postes et le temps cycle.

1.2.3.2. MALBP : MIXED-MODEL ASSEMBLY LINE BALANCING PROBLEM

Ce problème s'applique aux lignes d'assemblage à modèles mélangés, *i.e.* quand des produits différents sont fabriqués sur la même ligne d'assemblage. Il est une généralisation du SALBP car les critères à optimiser sont les mêmes, *i.e.*, minimisation du nombre de postes et/ou minimisation du temps cycle. Par conséquent, les méthodes de résolution du SALBP sont transposées pour répondre au MALBP.

Il faut noter que les contraintes de précédence sont plus complexes. Chaque produit dispose de son graphe de précédence. Et, il peut exister des incompatibilités entre opérations de deux produits.

Dans le cas du MALBP, le temps de traitement de chaque produit à un poste dépend du produit lui-même, contrairement au SALBP. Par conséquent, comme la charge de travail d'un opérateur sur un poste varie d'un produit à l'autre, il est parfois nécessaire d'associer ce

problème à un problème de séquençement, aussi appelé MSP². Le séquençement des produits consiste à trouver une séquence de produits en fonction d'un programme de production à court terme optimisant un certain critère (par exemple, trouver une séquence de produits garantissant une charge de travail aussi constante que possible).

1.2.3.3. GALBP : GENERALIZED ASSEMBLY LINE BALANCING PROBLEM

Pour les problèmes SALBP et MALBP, les opérations peuvent être affectées sur chacun des postes indépendamment des installations. Or, dans un contexte industriel, ce n'est souvent pas le cas. Le GALBP est une famille de problèmes qui sont des généralisations du problème d'équilibrage d'une ligne d'assemblage. Outre les contraintes de précédence (SALBP) et d'incompatibilité (MALBP), il prend en compte des contraintes moins usuelles (Boutevin, 2003) :

- Regroupement ou incompatibilité d'opérations (opérations devant être réalisées sur le même poste de travail ou sur des postes de travail différents),
- Affectation obligatoire (opérations devant être obligatoirement affectées à un poste de travail en raison d'installation non modifiable ou d'outillage non portable),
- Postes de travail parallèles (opérations devant être réalisées simultanément ou conjointement sur deux postes de travail),
- Position des opérateurs (localisation de l'opérateur par rapport au produit),
- Limitation des zones de stockage (prise en compte du gabarit des conteneurs contenant les pièces nécessaires à la réalisation des opérations),
- Ergonomie du poste de travail (limitation du nombre de postures différentes de l'opérateur sur un poste ou prise en compte de la hauteur des opérations à réaliser sur le produit),
- Compétences des opérateurs (niveau de formation ou aptitude des opérateurs),
- ...

Les critères d'optimisation, englobant les critères aperçus pour le SALBP et le MALBP, sont également plus variés. Ils peuvent être classés selon des critères économiques (minimisation des investissements ou des coûts de production), d'efficacité (maximiser la charge de travail des opérateurs sous la contrainte d'un seuil) et de stabilité (minimisation des modifications d'équilibrage lors d'un rééquilibrage). Ces critères sont pris en compte

² Mixed-model Sequencing Problem

individuellement ou conjointement. Dans le domaine automobile, ces critères sont pris en compte simultanément dans le cadre d'une prise de décision d'ordre économique.

Boutevin (2003) propose une méthode de résolution conjointe d'un problème d'ordonnancement d'activités et d'un problème d'affectation de ressources aux activités sous ces différentes contraintes, couvrant ainsi une grande partie des contraintes décrites ci-dessus.

1.2.4. L'EQUILIBRAGE DES POSTES DE TRAVAIL

En raison de la complexité des contraintes décrites ci-dessus, des exigences et des critères à optimiser, l'utilisation d'un outil d'équilibrage automatique s'annonce difficile à utiliser dans un atelier montage, c'est le cas pour PSA Peugeot Citroën. Par conséquent, chez PSA Peugeot Citroën, l'équilibrage est encore réalisé manuellement par le bureau des méthodes ; pour ceci, il exploite quelques outils et indicateurs que nous allons décrire dans cette section.

1.2.4.1. UN EQUILIBRAGE AUTOMATIQUE ENCORE INADAPTE

Les travaux de Boutevin (2003) en collaboration avec PSA Peugeot Citroën ont abouti à la réalisation d'un outil informatique en 2005 prenant en compte l'ensemble des contraintes précédemment citées (Leclaire, 2005). Partant d'un équilibrage donné et sous la contrainte d'un temps cycle fixé, il propose un rééquilibrage minimisant le nombre de postes de travail, tel que le temps de travail au poste pour tous les types de véhicules présents dans le programme de production prévisionnel n'excède pas le temps cycle.

Cependant, en raison des modifications trop nombreuses, les résultats proposés par cet outil ne garantissent pas une stabilité suffisante, même si des progrès sont encore envisageables dans ce domaine comme le montrent Gourgand et al (2006).

1.2.4.2. UN EQUILIBRAGE MANUEL

L'équilibrage est réalisé manuellement par le bureau des méthodes, une équipe composée d'équilibreur, de techniciens des méthodes et d'ergonomes. Les équilibreurs identifient les postes à améliorer, s'assurent du respect des contraintes d'équilibrage et décident des modifications à apporter sur la ligne d'assemblage en fonction des gains et des investissements évalués par les techniciens des méthodes. Les techniciens des méthodes chronomètrent les temps de traitement des tâches, proposent les améliorations, étudient les différentes solutions et évaluent financièrement l'impact des différentes possibilités (gains et investissements). Les ergonomes, quant à eux, analysent la posture des opérateurs et participent à l'amélioration des conditions de travail des opérateurs.

1.2.4.2.1. LA FREQUENCE DES EQUILIBRAGES

L'équilibrage, une opération complexe et coûteuse, est réalisé périodiquement. Deux fois par an, il est possible de procéder à des modifications d'infrastructure (déplacement d'outillage, déplacement de postes, ...). Mais, une fois par mois, il est limité à des ajustements permettant une adaptation des moyens de production à la demande commerciale. Dans ce cas, les modifications de l'équilibrage d'un mois sur l'autre doivent être limitées afin de stabiliser le plus possible les postes de travail. Un poste de travail stable assure la pérennisation des formations, un bon climat social et une qualité de fabrication accrue.

1.2.4.2.2. LE SCHEMA CHRONOLOGIQUE D'UN POSTE DE TRAVAIL

Le résultat de l'équilibrage est consigné dans les schémas chronologiques de poste (S.C.P.³). A partir de ces schémas et des données prévisionnelles, les équilibreurs visualisent la charge de travail des opérateurs et vérifient que la charge de travail prévisionnel de l'opérateur n'excède pas son temps de travail maximal autorisé.

Le schéma chronologique d'un poste de travail (Figure 1.6), associé à un type de véhicule, décrit l'ordre et la nature des tâches à réaliser, et le temps attribué à chacune d'elles (Tableau de gauche de la figure 1.6). Les tâches à répartir sur les postes de travail sont de deux natures : celles décrites dans la gamme de fabrication du véhicule et celles dites « opérations complémentaires » qui dépendent de l'ordonnancement des tâches d'une gamme sur un poste de travail (déplacement de l'opérateur, prise d'outils, ...). Le schéma chronologique d'un poste de travail représente graphiquement les déplacements de l'opérateur : déplacements effectués en réalisant les tâches sur le véhicule et déplacements réalisés en accédant à la zone de stockage (Graphique de droite de la figure 1.6).

Il est synthétique, compréhensible par tous et offre un support adapté à la formation des opérateurs.

³ Terme employé par PSA

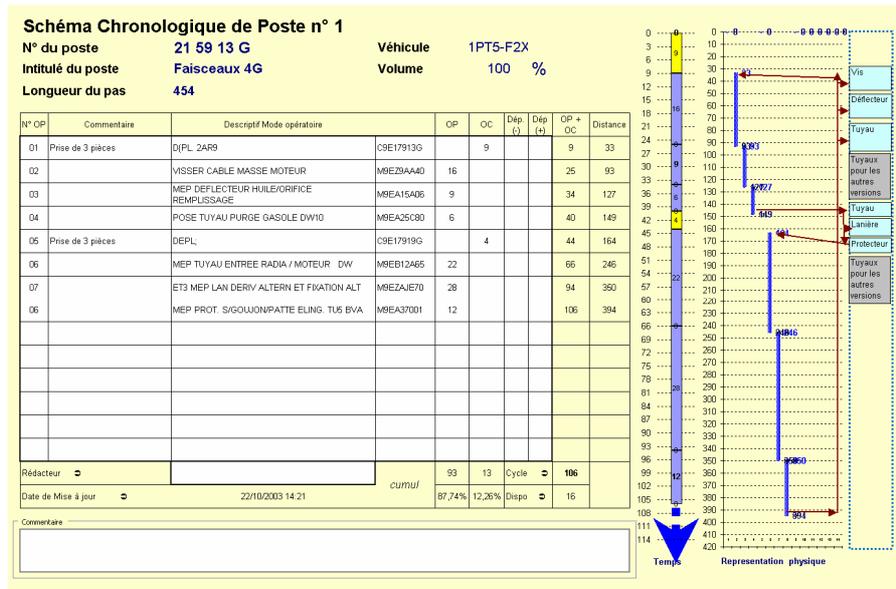


Figure 1.6 : Le schéma chronologique d'un poste

Nous noterons qu'il existe autant de schémas chronologiques de poste pour un poste de travail que d'ordonnancements de tâches différents. Nous considérerons les temps de chacune des tâches comme des temps déterministes, même si dans la pratique, cela se révèle rarement le cas. En fonction de la fatigue, de l'expérience ou de l'habileté d'un opérateur, les temps peuvent subir des variations.

1.2.4.2.3. LA CHARGE DE TRAVAIL D'UN OPERATEUR SUR UN POSTE

Le programme prévisionnel de production du mois à venir, transmis par la direction commerciale au bureau des méthodes, indique pour chaque type de véhicules à produire la quantité prévisionnelle du mois à venir. Le temps d'exécution de chaque type de véhicules sur chaque poste est calculé en utilisant les schémas chronologiques de poste définis précédemment.

Pour un poste de travail, les types de véhicules 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 1.7). Cette représentation est très largement utilisée dans les systèmes d'information de l'entreprise.

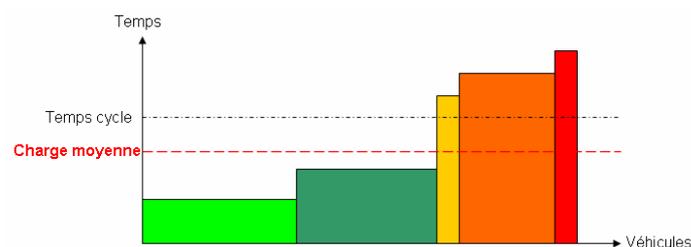


Figure 1.7 : Représentation de la charge de travail d'un opérateur sur un poste

La figure 1.7 comprend 5 temps de traitement différents sur ce poste, deux inférieurs au temps cycle (en nuance de vert) et 3 supérieurs au temps cycle (en nuance de rouge). 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.

1.2.4.2.4. LE COEFFICIENT D'EQUILIBRAGE

Pour évaluer la qualité d'un équilibrage, Dolgui et Proth (2006) présentent 3 indicateurs : le coefficient de perte de productivité, le coefficient de déviation maximale et le coefficient d'efficacité. Le coefficient de perte de productivité est le pourcentage global de temps d'inactivité. Le coefficient de déviation maximale mesure l'écart maximal entre la charge des postes de travail et leur capacité. Le coefficient d'efficacité mesure le degré auquel la capacité recherchée est atteinte. Ce dernier s'apparente au coefficient d'équilibrage utilisé par le groupe PSA Peugeot Citroën : le « Ke ».

Le coefficient d'équilibrage (Ke) peut être calculé pour un poste de travail, un ensemble de postes de travail et tous les postes de travail de la ligne principale d'assemblage. Cet indicateur (équation 1.1) mesure le taux d'occupation moyen des opérateurs. Il correspond au rapport entre le temps de travail maximal (somme des temps de présence des opérateurs) et le temps de travail effectif (somme des temps de traitement des véhicules évalués par les schémas chronologiques de poste).

$$Ke = \frac{\text{Temps de travail maximal}}{\text{Temps de travail effectif}} \quad (1.1)$$

Pour assurer une bonne utilisation des opérateurs, l'objectif fixé par les services centraux aux ateliers montage est d'avoir un indicateur proche de 1,12 (les opérateurs doivent être occupés 89% de leur temps de travail en moyenne). Aujourd'hui, selon les sites de production, cet indicateur oscille entre 1,16 et 1,13.

1.2.4.2.5. LE PROJET APOLO

Depuis fin 2002, dans le cadre du projet Convergence, le groupe a initié un projet concernant l'Amélioration et l'efficacité des POstes de travail, et la LOgistique alternative (APOLO). Ce projet comporte deux volets : l'équilibrage d'un poste de travail et la logistique. Le premier volet concerne l'organisation du poste de travail de l'opérateur et la répartition de ces tâches. Le but de ce volet est de permettre à l'opérateur de réaliser toutes ses tâches sur un seul pas de travail. L'idée maîtresse est de réduire le nombre de pics de charge en modifiant les gammes de travail de façon à les rendre sécables et faciliter ainsi une meilleure répartition. On aboutit à un équilibrage de moins en moins sensible au mixe. Les postes restant sensibles

au mixe nécessiteront une adaptation périodique à l'image de ce qui est fait aujourd'hui. Le deuxième volet concerne l'approvisionnement des pièces en bord de ligne.

Nous nous focaliserons sur le premier volet de ce projet en étudiant la prise en compte de la flexibilité dans l'organisation du poste de travail.

1.2.4.3. L'IDENTIFICATION DES POSTES DE TRAVAIL A ADAPTER

Les équilibreur identifient les postes de travail à modifier en fonction de la charge moyenne de travail d'un opérateur, du coefficient d'équilibrage ou des difficultés rencontrées au jour le jour dans l'atelier montage.

Si la charge moyenne prévisionnelle d'un opérateur excède le temps cycle, il est indispensable de réduire la charge de travail de cet opérateur (en déplaçant des tâches ou en renforçant le poste par l'ajout d'un opérateur).

Le coefficient d'équilibrage est utilisé pour comparer les différents sites de production entre eux. Aussi, afin d'atteindre les objectifs fixés, les postes de travail ayant une faible utilisation de l'opérateur doivent être adaptés. Si le nombre d'opérateurs affectés au poste est trop important, il suffit d'en déplacer ou d'en supprimer un. Si l'opérateur a de nombreux temps morts, il est possible de lui ajouter des tâches supplémentaires. Ces tâches peuvent éventuellement provenir du cas précédent.

Enfin, si les opérateurs se plaignent de la difficulté à réaliser correctement leur travail, les équilibreurs demandent aux techniciens des méthodes une étude approfondie basée sur l'observation du poste de travail.

1.2.4.4. DE L'EQUILIBRAGE AU SEQUENCMENT DES VEHICULES

Comme nous l'avons abordé pour le MALBP et le GALBP, le problème d'équilibrage de lignes d'assemblage est souvent couplé à un problème de séquençement de produits. Dans le domaine automobile, le problème de séquençement des véhicules est connu sous le nom de « Car Sequencing Problem ». Les véhicules avec un temps de traitement sur un poste de travail supérieur au temps cycle provoquent des pics de charge et contraignent le séquençement des véhicules.

Un des objectifs du séquençement est de fournir une liste de véhicules lissant la charge de travail des opérateurs en espaçant les véhicules provoquant des pics de charge. Les postes de travail ayant ce type de véhicules doivent être capable d'absorber une certaine variation du volume de ces véhicules au jour le jour. Cette flexibilité doit garantir le respect des choix adoptés lors du rééquilibrage sans avoir besoin de renforcer les postes de travail concernés.

Dans la section suivante, nous présenterons les principes du séquençement et les méthodes d'optimisation les plus utilisées.

1.3. LE SEQUENCEMENT DES VEHICULES

Les constructeurs automobiles comme Toyota, Nissan, Renault ou PSA Peugeot Citroën créent une liste unique quelques jours avant la production. Ils essaient de la respecter à l'entrée de l'atelier montage afin d'optimiser la synchronisation entre l'approvisionnement des pièces en bords de ligne et le flux principal de fabrication des véhicules.

Pour débiter, nous décrirons les critères intervenant dans la construction de cette séquence. Puis, nous présenterons succinctement l'outil de séquençement que nous avons utilisé dans notre étude. Cet outil est issu de travaux de recherche entrepris au sein du groupe PSA Peugeot Citroën depuis une quinzaine d'années.

1.3.1. LES CRITERES A OPTIMISER

Giard et Jeunet (2006) présentent une modélisation du problème général d'ordonnancement de véhicules sur une ligne de production et d'assemblage dont l'objectif est de minimiser un coût global. Cet article contient un état de l'art détaillé et récent concernant les différents critères à optimiser tels que la minimisation du nombre de changement de teintes, le lissage de la charge de travail, le lissage de la consommation de pièces ou le respect des contraintes d'espacement.

Dans la suite de cette section, nous verrons comment, dans l'industrie automobile, les critères comme le lissage de la consommation de pièces et le respect des contraintes d'espacement participent au lissage de la charge de travail des opérateurs.

1.3.1.1. LISSAGE DE LA CHARGE DE TRAVAIL

Pour chaque véhicule passant à un poste de travail, un opérateur suit un schéma chronologique de poste. Il effectue ces tâches en un temps déterminé. Durant ce temps, le véhicule avance sur la ligne et l'opérateur suit le véhicule (Figure 1.8).

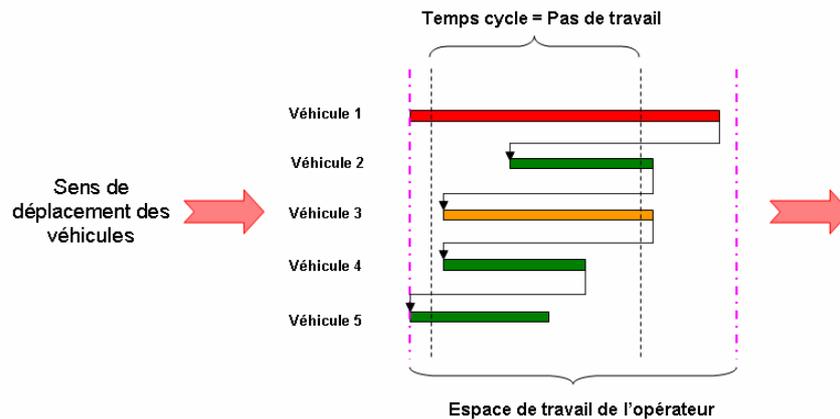


Figure 1.8 : Déplacement d'un opérateur sur un poste de travail

La figure 1.8 visualise les déplacements d'un opérateur à son poste de travail de gauche à droite lorsqu'il travaille (barres colorées) et de droite à gauche lorsqu'il revient pour traiter le véhicule suivant (flèches noires). Le pas de travail est matérialisé par les traits pointillés noirs et l'espace de travail par les traits mauves discontinus. Les barres oranges, rouges et vertes représentent trois types de véhicules.

Quand un véhicule provoquant un pic de charge arrive (en rouge), l'opérateur prend du retard. Comme les véhicules avancent tous à la même vitesse, l'opérateur ne peut pas commencer le véhicule suivant au début de son espace de travail (cas du deuxième véhicule). Il a besoin de deux véhicules ne provoquant pas de pic de charge (en vert) pour récupérer le retard pris par un véhicule rouge. Si un véhicule nécessite un temps de traitement équivalent au temps cycle (en orange), l'opérateur ne prend ni du retard, ni ne peut en récupérer.

Pour mesurer l'efficacité d'un poste de travail en fonction d'une séquence de véhicules, Thomopoulos (1967) propose 4 critères basés sur l'analyse des déplacements d'un opérateur à son poste de travail (Figure 1.9) :

- Le « temps mort » ou « idleness » est le temps d'attente de l'opérateur entre deux véhicules,
- Le « Manque de travail » ou « Work deficiency time » est le temps passé par l'opérateur à traiter un véhicule entre le début de son espace de travail et le début de son pas de travail,
- Le « Temps de débordement » ou « Work congestion time » est le temps passé par l'opérateur à traiter un véhicule au delà de la limite de son pas de travail, mais avant la fin de son espace de travail,
- Le « Temps de dépassement » ou « Utility work time » est le temps nécessaire pour terminer le véhicule lorsqu'il sort de son espace de travail. Quand cela

survient, la ligne d'assemblage peut être arrêtée (Kim, 2001) ou un opérateur polyvalent intervient pour compléter le travail inachevé de l'opérateur affecté au poste de travail (Giard et Jeunet, 2006).

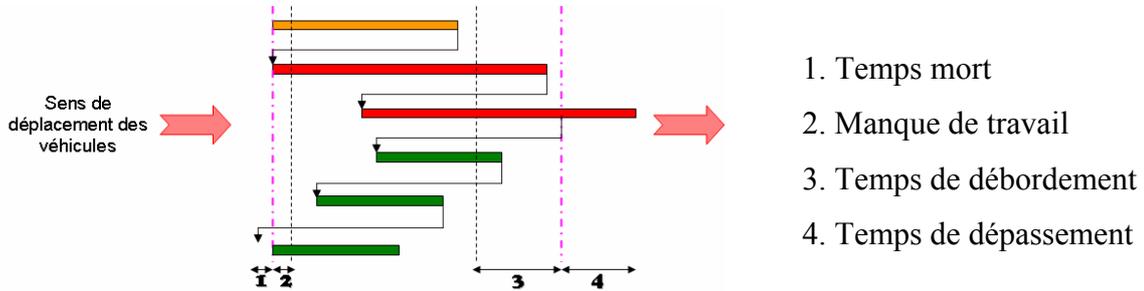


Figure 1.9 : Mesures de l'efficacité d'un poste

Pour limiter les temps de dépassement, certaines pratiques consistent à lisser la consommation du temps de traitement des véhicules de la même façon que nous pourrions lisser la consommation des pièces.

1.3.1.2. LISSAGE DE LA CONSOMMATION DE PIÈCES

Ce critère est celui initialement poursuivi par Toyota dans un environnement de juste-à-temps. La technique la plus souvent utilisée est celle du Goal Chasing (Monden, 1983). En effet, une consommation de pièces aussi régulière que possible augmente le temps entre deux consommations de la même pièce et permet de réduire les stocks de pièces commandées en RECOR ou KANBAN. Miltenburg (1989) montre que lisser la production de différents modèles revient à lisser la consommation des composants nécessaires aux opérations d'assemblage.

L'objectif de ce critère, illustré par la figure 1.10, pour un composant i est de minimiser la somme des écarts quadratiques entre la consommation effective, C_k , et la consommation optimale, O_k .

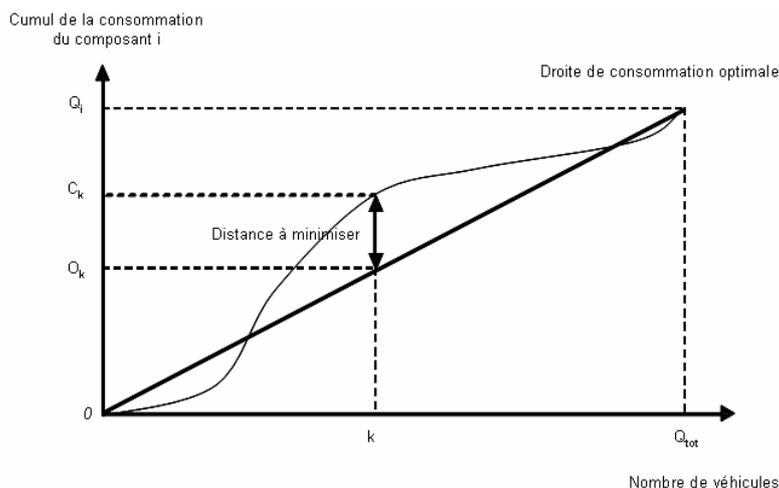


Figure 1.10 : Lissage de la consommation d'une pièce

Sumichrast et al (1992) utilisent ce principe pour lisser la charge de travail d'un opérateur sur un poste de travail. Ils remplacent la consommation d'un composant par le temps mis par un opérateur pour traiter un véhicule sur le poste de travail. La consommation réelle correspond au cumul des temps de traitement de l'opérateur pour traiter les véhicules. La droite de consommation optimale devient la droite représentant le lissage optimal de la charge de travail de l'opérateur.

Comme une ligne d'assemblage automobile compte un très grand nombre de postes de travail, il n'est pas évident de garantir une qualité de lissage suffisante sur tous les postes de travail simultanément. Aussi, l'analyse des points critiques de la ligne d'assemblage nous permet de définir quelques critères qu'il suffit de lisser comme la consommation d'une pièce pour lisser la charge de travail.

1.3.1.3. RESPECT DES CONTRAINTES D'ESPACEMENT

Le lissage de la charge de travail des opérateurs peut être exprimé avec une contrainte d'espacement. Les véhicules provoquant des pics de charge sont identifiés par un critère⁴. Puis, ils sont espacés en respectant au mieux un ratio de type N/P. Cette contrainte d'espacement signifie que la séquence de véhicules ne doit pas avoir plus de N véhicules répondant au critère parmi une fenêtre de P véhicules. Nous reviendrons plus en détail sur ces aspects dans le chapitre 3 « Définition des contraintes d'espacement ».

Sur la figure 1.11, nous avons une contrainte d'espacement avec un ratio 1/5 pour les véhicules avec une finition haut de gamme. La séquence présentée ne respecte pas, par deux fois, le ratio indiqué (véhicules cerclés de rouge).

⁴ Un critère est une option ou une combinaison d'options

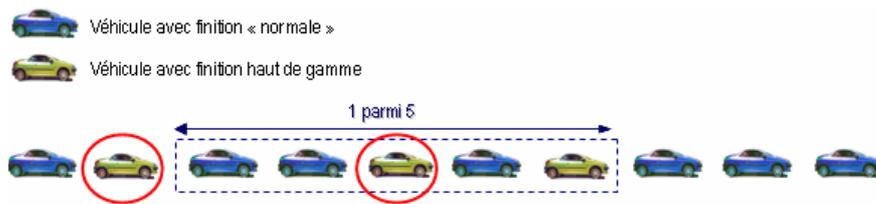


Figure 1.11 : Contrainte d'espacement sur un véhicule « haut de gamme » en 1/5

Initialement introduit par Parello et al (1986), le ratio représentait une contrainte de capacité dans une séquence découpée en sous séquences disjointes. Puis, Dincbas et al. (1988) ont proposé la fenêtre glissante pour garantir un meilleur respect de la contrainte de capacité.

Selon Giard et Jeunet (2006), les contraintes d'espacement s'appliquent à deux types de postes de travail :

- Les postes capacitaires imposent un respect strict du ratio en raison des installations. Par exemple, à Sochaux, le robot qui pose les toits ouvrants traite un véhicule avec toit ouvrant tous les trois véhicules car il a besoin de 3 fois le temps cycle pour traiter un tel véhicule. Si deux véhicules avec le toit ouvrant ne respectent pas ce ratio de 1/3, la ligne d'assemblage s'arrête. Il faut attendre que le robot termine et soit à nouveau disponible pour réaliser le véhicule suivant.
- Les postes non capacitaires n'imposent pas un respect strict du ratio car ils peuvent être ponctuellement renforcés à l'aide d'un ou plusieurs opérateurs polyvalents. Si le ratio de la contrainte n'est pas respecté, l'opérateur sollicite l'aide d'un opérateur polyvalent. Cette sollicitation consiste à compléter le travail inachevé ou à traiter complètement le véhicule qui provoque le temps de dépassement avant que le véhicule ne sorte de l'espace de travail.

Pour Toyota, il n'existe pas de distinction entre ces deux types de postes. En effet, lorsqu'un opérateur sort de son espace de travail, il stoppe la ligne d'assemblage et finit son travail avant de la relancer. L'arrêt est signalé aux autres opérateurs par un tableau lumineux, dit tableau « ANDON » (Monden, 1983). Afin de minimiser ces arrêts, Tsai (1992) propose de minimiser simultanément les temps de dépassement et le risque d'arrêt de la ligne.

Néanmoins, les postes capacitaires et non capacitaires peuvent être distingués entre eux par une notion de priorité. Dans le premier cas, le non respect d'une des contraintes d'espacement arrêtera impérativement la ligne d'assemblage et provoquera une perte de productivité. Dans le deuxième cas, le non respect d'une de ces contraintes provoquera

l'intervention d'un opérateur suppléant engendrant un surcoût pour disposer d'un opérateur polyvalent. L'aspect économique sera un facteur important dans le choix de la priorité.

Afin de limiter les arrêts de ligne ou les renforts sur la ligne d'assemblage, la séquence doit donc minimiser le nombre de non respects de ces contraintes d'espacement. Pour PSA Peugeot Citroën, le suivi quotidien de cet objectif est réalisé par la coordination de production, le service responsable de la synchronisation des flux et de la relation avec la direction commerciale.

1.3.2. LA RESOLUTION DU PROBLEME DE SEQUENCMENT

De très nombreux articles portent sur le séquençement des lignes à modèles mélangés. Par conséquent, l'objectif de cette section n'est pas de donner un état de l'art complet sur le sujet, mais de se focaliser sur quelques techniques employées. Un état de l'art du problème antérieur à 1997 est donné dans (Comby, 1996) et dans (Delaval, 1997). Récemment, il a été complété par Solnon et al (2006) dans le cadre du challenge ROADEF'05.

1.3.2.1. LES ENJEUX

Comme le font remarquer Joly (2004) ou Giard et Jeunet (2006), la plupart des articles sur le séquençement se focalisent sur un seul critère à la fois (lissage ou espacement).

Cette approche ne satisfait pas les industriels de l'automobile. Afin d'améliorer leur rentabilité, ils doivent maîtriser parfaitement leur chaîne logistique. Cette maîtrise permet de réduire la taille des stocks au minimum et de synchroniser l'approvisionnement des pièces avec les véhicules à fabriquer. Pour y parvenir, il est indispensable d'intégrer dans la construction de la liste un maximum de contraintes afin de minimiser les perturbations possibles. Aujourd'hui, le changement des teintes et le lissage de la charge de travail sont les deux critères principaux.

1.3.2.2. LES APPROCHES DE RESOLUTION DU CHALLENGE ROADEF'05

Entre 2003 et 2005, un challenge sur ce thème, opposant des équipes industrielles et universitaires, a été organisé par la ROADEF⁵ et sponsorisé par le constructeur automobile RENAULT (Nguyen et Cung, 2005). Il a permis de réaliser un état de l'art des techniques utilisables et de les comparer entre elles.

Ce challenge se caractérise par le besoin du constructeur automobile RENAULT d'améliorer sa chaîne logistique en construisant les véhicules dans l'ordre répondant au mieux

⁵ société française de recherche opérationnelle et d'aide à la décision

aux contraintes industrielles de l'atelier peinture et de l'atelier montage. Pour minimiser les coûts de l'atelier peinture, il était nécessaire de minimiser le nombre de changements de teintes sous la contrainte d'une taille limite de convois. Pour minimiser les perturbations dans l'atelier montage, il était nécessaire de minimiser le nombre de non respects des contraintes d'espacement prioritaires (cas des postes capacitaires) et non prioritaires (cas des postes non capacitaires).

Ces objectifs ont une importance différente en fonction des coûts de main d'œuvre. Les contraintes d'espacement peuvent être ou non prioritaire sur les convois.

Solnon et al (2006) présentent les méthodes exactes et heuristiques utilisées lors du challenge par les différentes équipes. Les méthodes heuristiques sont caractérisées par l'élaboration d'une solution en deux phases. Une solution initiale, créée de manière constructive, est améliorée à l'aide d'une méta-heuristique (recherche par voisinage, algorithme génétique, ...).

1.3.2.3. LA LOGIQUE FLOUE

L'approche du problème par la logique floue n'a pas été explorée lors du challenge. Cette approche, adaptée à la résolution de problèmes multi objectifs (Felix, 1994), est appliquée à la construction d'une séquence de véhicules chez BMW et Audi. Elle répond exactement à la même problématique que le challenge. Ces entreprises utilisent l'application « Qualicision © » commercialisée par Fuzzy Logik Systeme (FLS) GmbH (Kochan, 2003).

L'approche utilisée s'apparente à une construction progressive de séquence. A chaque position, le meilleur véhicule est sélectionné. Pour réaliser ce choix, une pénalité est calculée pour chacun des véhicules restants et le véhicule le moins pénalisant est choisi. L'évaluation de la pénalité repose sur la définition de fonctions d'effet pouvant prendre les valeurs comprises entre -1 et 1. Chaque critère à optimiser dispose d'une fonction d'effet. La pénalité d'un véhicule correspond à l'application de la théorie mathématique des sous-ensembles flous avec les pénalités évaluées pour chacun de ces critères.

1.3.2.4. LA RESOLUTION ADOPTEE PAR PSA PEUGEOT CITROËN

La solution adoptée par PSA Peugeot Citroën est proche des solutions abordées par les concurrents du challenge ROADEF et par FLS. Guerre-Chaley (1995) définit le principe de la pénalité d'un véhicule. Delaval (1997) et Baratou (1998) proposent un algorithme de reséquenceur intermédiaire (ARI) résolvant localement les contraintes industrielles par la minimisation de la pénalité des véhicules. Suite à ces travaux, cet algorithme a été

industrialisé et généralisé dans les usines terminales du groupe PSA Peugeot Citroën pour piloter les stocks de véhicules disposés entre les ateliers. En 2000, cet outil a été adapté en interne pour construire la LUO. Joly (2004) a proposé un module d'optimisation additionnel, basé sur la recherche à voisinage variant.

Dans la suite de notre document, l'outil de séquençement utilisé pour nos analyses correspond au couplage d'ARI et du module d'optimisation additionnel (Joly, 2004). Cet outil de séquençement doit proposer une séquence de véhicules qui minimisent le nombre de non respects des contraintes d'espacement. Ces contraintes d'espacement, issues de l'équilibrage de la ligne d'assemblage, doivent être définies en prenant en compte une certaine flexibilité.

1.4. 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 en minimisant les coûts de production.

Pour commencer, nous donnons quelques généralités sur la flexibilité. Puis, nous présenterons la flexibilité employée par PSA Peugeot Citroën pour adapter les moyens de production.

1.4.1. GENERALITES

Tout comme les deux précédentes parties, nous ne présenterons pas un état de l'art détaillé de la flexibilité et de la mesure de la flexibilité. En effet, ces dernières années, la littérature sur le sujet est très abondante. Cependant, nous noterons les travaux de Erol (1999) pour l'état de l'art de la flexibilité manufacturière, Thomas (2003) pour la classification des différentes dimensions et pour les outils de mesure de cette flexibilité et Gupta (2004) pour caractériser cette flexibilité dans l'industrie. De plus, Thomas et Penz (2002) donnent une synthèse de la littérature concernant le sujet.

1.4.1.1. NECESSITE DE LA FLEXIBILITE

Selon l'approche de Corrêa (1994a), les deux raisons pour lesquelles une entreprise doit recourir à la flexibilité sont : l'incertitude et la variabilité. 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.

1.4.1.2. LA FLEXIBILITE DANS UN ATELIER

Erol (1999) recense les différents leviers de flexibilité dont dispose une entreprise pour faire face aux changements de son environnement. Nous pouvons les résumer ainsi :

- Pour les moyens de production, l'entreprise peut agir sur les installations (robots, lignes de transfert, ateliers flexibles ...) ou sur les ressources humaines (contrats de travail, horaires, ...)
- Pour les moyens de gestion de production, elle peut agir sur les modes de pilotages (flux tirés ou poussés) ou sur les modes de gestion (stock, surcapacité,...)
- Pour les moyens d'achat, elle peut agir sur les types de contrat (Juste à temps, Synchronisé, ...) et de relation (Fournisseur, Sous-traitant, Partenariat, ...),
- Pour les systèmes d'information, elle peut agir sur le réseau et sur la technologie de l'information,
- Pour le produit, elle peut agir sur les modes de conception (standardisation, modularité, ...) ou les modes de finition.

Dans le paragraphe 1.2.4.4. « De l'équilibrage au séquençage des véhicules », nous avons indiqué que le rééquilibrage de la ligne d'assemblage doit rendre les postes de travail suffisamment flexibles pour être capable d'absorber une certaine variation de production. Cette flexibilité doit éviter le renforcement des postes de travail. Donc, pour notre étude, les leviers de flexibilité utilisés dans l'atelier se résument aux moyens de production et à la polyvalence. Les installations sont adaptées lors des équilibrages biannuels et le dimensionnement humain⁶ est ajusté tous les mois. Dans le cas où la charge de travail n'est pas assez lissée, l'atelier montage doit disposer d'une équipe d'opérateurs polyvalents susceptibles d'intervenir rapidement sur chaque poste de travail pouvant compter un opérateur en difficulté.

⁶ La modification des horaires de travail ou le choix des types de contrat ne font pas partie du périmètre de notre étude.

1.4.2. LA FLEXIBILITE EN ORDONNANCEMENT DES VEHICULES

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 travail, 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.

1.4.2.1. LES BESOINS DE LA FLEXIBILITE DEMANDEE AU MONTAGE

Le processus conduisant à la fabrication d'un véhicule peut être perturbé, et donc nécessite des marges de flexibilité pour 3 phénomènes détaillés ci-après : les erreurs de prévision, le séquençement et les aléas de production.

1.4.2.1.1. LES PREVISIONS

Pour dimensionner les postes de travail, le bureau des méthodes se base sur les prévisions de la direction commerciale pour le mois à venir.

Néanmoins, malgré les études réalisées par la direction commerciale pour maîtriser ses prévisions, certaines des options pénalisant l'atelier montage ne suivent pas les prévisions prévues au niveau mensuel ou hebdomadaire. De plus d'une journée sur l'autre, le programme de production n'est pas rigoureusement identique. Par conséquent, le volume des véhicules soumis au critère d'une contrainte d'espacement varie d'une journée sur l'autre. PSA a choisi de privilégier le délai client, ainsi pour absorber dans les temps ces variations commerciales ou quotidiennes, la coordination de production demande au bureau des méthodes d'avoir un équilibrage flexible.

1.4.2.1.2. LE SEQUENCEMENT DES VEHICULES

Dans un deuxième temps, même en supposant que les prévisions sont parfaites et que les demandes sont parfaitement lissées, il faut ajouter de la flexibilité pour faciliter le séquençement des ordres de fabrication.

Le bureau des méthodes demande de lisser le plus régulièrement possible les véhicules provoquant un pic de charge pour garantir un bon climat social et surtout, pour ce qui

concerne le travail, s'assurer que les opérateurs puissent travailler sans solliciter l'aide d'un opérateur polyvalent. Pour lisser la charge de travail, le bureau des méthodes définit des contraintes d'espacement. Même, si elles sont bien définies, une contrainte d'espacement peut impacter plusieurs postes de travail qui nécessitent tous la même flexibilité. De plus, un véhicule peut être porteur de plusieurs contraintes et les respecter toutes peut être une source de difficulté supplémentaire. L'impossibilité de respecter les contraintes d'espacement, *i.e.* de garantir un lissage de la charge de travail des opérateurs aussi régulier que possible, est en particulier due à un phénomène nouvellement identifié qui dépend du nombre de véhicules soumis à plusieurs contraintes d'espacement.

Aujourd'hui, pour absorber ce phénomène, un surdimensionnement différemment évalué par les sites de production est demandé :

- Le site de Sevel Nord réalise des simulations à l'aide d'un outil complexe reproduisant les conditions du pilotage du stock amont à l'atelier montage (VALPARAISO). Une simulation fournit une séquence de véhicules pour une journée de production et indique le nombre de véhicules produits et le nombre de non respects pour chaque contrainte d'espacement. Les ratios des contraintes d'espacement les moins respectées sont alors ajustés pour éliminer les non respects jusqu'à obtenir un compromis satisfaisant.
- Les sites de Poissy et de Rennes s'appuient sur une matrice représentant les taux de croisements des contraintes d'espacement prises deux à deux pour adapter les marges aux différentes contraintes d'espacement.

Notons que le site de Sochaux n'en tient pas compte.

1.4.2.1.3. LES ALEAS DE PRODUCTION

Enfin, même si le séquencement prévisionnel conduisait à une liste parfaitement régulière de véhicules ordonnancés, les aléas de production, comme les pannes ou les défauts d'approvisionnement, constituent une dernière source de perturbation qui peut provoquer un mauvais lissage de la charge de travail.

Aujourd'hui, PSA Peugeot Citroën s'est engagé dans une politique forte visant à conserver l'ordre des véhicules séquencés 5 jours plus tôt comme en témoigne les travaux de Bernier (2000) et de Joly (2005). Les moyens mis en œuvre par le groupe pour maîtriser son processus de fabrication et réduire les perturbations permettent d'envisager à terme la possibilité de ne pas surdimensionner les moyens de production pour cause d'aléas de

production. Par conséquent, nous supposons que cet élément de perturbation est ou deviendra négligeable.

1.4.2.2. CALCUL DE LA MARGE DE SECURISATION

Pour garantir la production des véhicules commandés par les clients, pour faciliter le lissage de la charge de travail des opérateurs et pour prévenir les pannes et les problèmes d’approvisionnement, il est demandé au bureau des méthodes de dimensionner l’atelier montage en prenant en compte de la flexibilité. Cette flexibilité est représentée par une marge de sécurisation en fonction du volume prévisionnel des véhicules provoquant un pic de charge. Cette marge de sécurisation contribue à rendre l’atelier montage flexible.

Pour Nissan ou Toyota, l’atelier montage ne déclare aucune contrainte d’espace. Théoriquement, les opérateurs peuvent enchaîner les véhicules dans n’importe quel ordre sans devoir demander de l’aide ou arrêter la ligne de production. La flexibilité offerte par l’atelier montage est donc très importante.

PSA Peugeot Citroën a une approche différente. Une étude statistique sur des données réelles a été réalisée en 1992 chez PSA Peugeot Citroën pour déterminer la flexibilité nécessaire dans le cas où le groupe déciderait de fournir 95 % des ordres de fabrication dans les délais dès la prise de commande du client.

Cette étude a montré que, pour une contrainte, à taux d’application programmé à « $\frac{CMJ}{Q_{tot}}$ » (pourcentage de véhicules répondant à la contrainte ou possédant le composant) au sein d’une famille de véhicules dont le volume quotidien est fixé contractuellement à « Q_{tot} », la distribution des valeurs possibles des volumes quotidiens de véhicules de la famille possédant ce critère est approximativement celle d’une loi normale de moyenne « CMJ » et de variance « $2 * CMJ * \left(1 - \frac{CMJ}{Q_{tot}}\right)$ ».

Cette étude a ainsi conduit à définir une règle de calcul, appelée Loi Flexibilité Groupe ou dite de « Hédin » (équation 1.3), qui majore le volume prévisionnel d’une marge de sécurisation (équation 1.2) en fonction d’un indice de flexibilité, I_f .

$$\text{Marge}_c = I_f * \sqrt{2 * CMJ_c * \left(1 - \frac{CMJ_c}{Q_{tot}}\right)} \quad (1.2)$$

Avec c : critère considéré
 CMJ_c : Consommation Moyenne Journalière de c
 I_f : Indice de flexibilité à appliquer
 Q_{tot} : Volume total journalier

Ce qui revient à faire un dimensionnement pouvant absorber les quantités Q_c .

$$Q_c = CMJ_c + \text{Marge}_c \quad (1.3)$$

Cette loi est actuellement utilisée pour 3 applications avec des valeurs différentes de l'indice de flexibilité, I_f (figure 1.12) :

- Estimation de la flexibilité offerte au commerce ($I_f = 1,5$) : assurance contre les écarts entre les prévisions et la production,
- Estimation de la flexibilité demandée à l'atelier montage ($I_f = 2,5$) : besoin incluant la première estimation et assurance contre les irrégularités dues au séquençement et aux aléas de production,
- Estimation de la flexibilité demandée aux fournisseurs (I_f entre 2,8 à 3,8) : assurance contre la variabilité de la consommation de pièces.
-

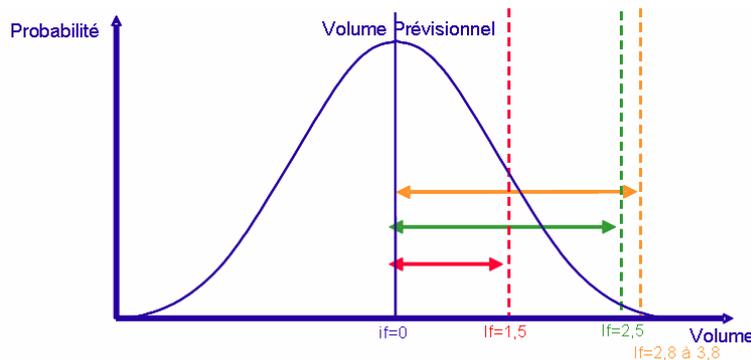


Figure 1.12 : Les indices de flexibilité utilisés

Comme notre problème concerne le dimensionnement de l'atelier montage, nous utiliserons l'estimation de la flexibilité demandée à l'atelier montage ($I_f = 2,5$).

Pour chacune des contraintes d'espace, la flexibilité demandée au montage se matérialise par la majoration du volume prévisionnel journalier⁷ d'une marge de sécurisation. Les équilibreurs doivent donc dimensionner les postes de l'atelier montage pour qu'ils puissent répondre à la flexibilité demandée.

⁷ Aussi, appelé « consommation moyenne journalière » (CMJ)

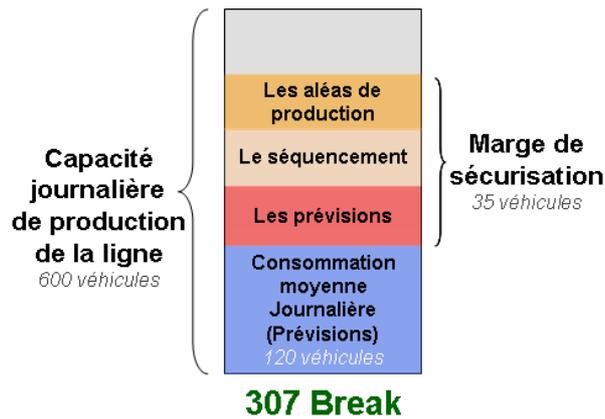


Figure 1.13 : Exemple de la majoration du volume prévisionnel d'une contrainte d'espace

La figure 1.13 illustre la flexibilité demandée pour la contrainte d'espace caractérisant les véhicules 307 Break. Dans cet exemple, nous avons 120 véhicules 307 Break dans le programme prévisionnel sur les 600 véhicules à produire quotidiennement. En appliquant la loi Hédin avec la flexibilité demandée à l'atelier montage, *i.e.* $I_f = 2.5$, nous estimons la marge de sécurisation à 35 véhicules supplémentaires. Par conséquent, les postes de travail concernés par cette contrainte d'espace doivent être capable de produire 155 véhicules pour une journée, soit environ un quart de la production journalière.

1.5. L'ENJEU ET L'OBJECTIF DE LA THESE

1.5.1. UN ENJEU ECONOMIQUE

La flexibilité demandée à l'atelier montage est très liée à la définition des contraintes d'espace. Une ligne d'assemblage ne nécessitant pas de définir des contraintes d'espace est une ligne d'assemblage offrant une très grande flexibilité car les véhicules peuvent être engagés dans un ordre quelconque. Comme nous l'avons précédemment décrit, les pics de charge ont été définis par les équilibreur pour optimiser un coût de fabrication lié à la main d'œuvre ou aux installations. Et, les contraintes d'espace qui en résultent restreignent la flexibilité offerte par l'atelier montage car elles interdisent certaines successions de véhicules. Par conséquent, il faut trouver un juste milieu entre « avoir une flexibilité très importante », *i.e.* ne pas avoir de contraintes d'espace, et « manquer de flexibilité », *i.e.* avoir un trop grand nombre de contraintes d'espace.

Par exemple, en 2005, les équilibreurs du site de production de Sochaux définissaient 10 contraintes d'espace sur une ligne de production. Chacune de ces contraintes permettaient d'économiser environ 4 opérateurs, sachant qu'un opérateur coûte environ 44.000 €/an. Pour supprimer les 10 contraintes, il fallait ajouter au moins 40 opérateurs sur

cette ligne. Par conséquent, l'investissement nécessaire s'élevait à environ $4 \times 10^4 \times 44.000 = 1,76$ M€/an. Ici, nous pouvons en conclure que la définition de 10 contraintes d'espacement sur cette ligne d'assemblage permet d'économiser 1,76 M€/an au groupe.

Mais, pouvons-nous encore faire des économies en définissant davantage de contraintes d'espacement ? Pouvons-nous garantir que la ligne d'assemblage a une flexibilité suffisante pour absorber les variations et les incertitudes ? Quels moyens devons-nous mettre en place pour s'assurer de la faisabilité d'un programme de production ? Telles sont quelques unes des questions que notre travail de thèse se propose d'y répondre.

1.5.2. OBJECTIF DE LA THESE

L'objectif principal de la thèse porte sur la flexibilité de l'atelier montage et en particulier sur l'évaluation de la flexibilité disponible et son ajustement à la flexibilité demandée à l'atelier montage. Pour y parvenir, il est indispensable de localiser les postes de travail ayant besoin de flexibilité et d'évaluer les coûts d'adaptation de ces derniers pour s'ajuster le mieux possible aux demandes commerciales.

1.5.2.1. LOCALISATION DES BESOINS DE LA FLEXIBILITE

Comme nous l'avons indiqué dans le paragraphe 1.2.4.3. *L'identification des postes de travail à adapter*, les équilibreur identifient les postes de travail à modifier en fonction de la charge moyenne de travail d'un opérateur, du coefficient d'équilibrage ou des difficultés rencontrées au jour le jour dans l'atelier montage. Malheureusement, nous constatons que la flexibilité n'est pas présente dans leur critère de choix. Pire encore, ils traitent certains problèmes après qu'ils sont survenus.

L'identification, *a priori*, des postes de travail à adapter est une priorité qui doit permettre aux équilibreurs d'affecter les moyens nécessaires aux points critiques de la ligne d'assemblage.

1.5.2.2. S'AJUSTER A LA FLEXIBILITE DEMANDEE

Pour le bureau des méthodes, la flexibilité demandée au montage par la coordination de production peut nécessiter une répartition différente des moyens humains ou matériels. Pour chacun de ces postes de travail, nous devons évaluer la flexibilité offerte en volume. Cette flexibilité, comparée à la flexibilité demandée, permettra au bureau des méthodes d'évaluer le coût des différents aménagements possibles et de faire les choix les plus appropriés.

1.5.3. POSITIONNEMENT DES TRAVAUX

Dans l'industrie automobile, la flexibilité des moyens industriels est une réponse utilisée par les entreprises pour faire face à une concurrence accrue. Pour Thomas et Penz (2002), cette flexibilité est souvent associée à la flexibilité des ressources humaines (annualisation du temps de travail, aménagement des horaires ou contrats de travail), aux ateliers flexibles (Flexible Manufacturing System) ou aux machines flexibles (Machine outil à commandes numériques). Plus rarement, cette flexibilité est associée à l'ordonnancement de tâches (Billaut et al., 2006). Et, à notre connaissance, la prise en compte de la flexibilité lors de l'équilibrage d'une ligne d'assemblage a été peu abordée dans la littérature.

Pour Thomopoulos (1967), la bonne gestion d'une ligne d'assemblage passe par le traitement successif de deux problèmes : l'équilibrage et le séquençement. L'équilibrage répartit les tâches, les outils et les opérateurs sur les différents postes de travail jalonnant une ligne d'assemblage (Scholl et Becker, 2006). Parfois, le terme « rééquilibrage » est utilisé lorsqu'il s'agit d'adapter un équilibrage existant. Le rééquilibrage propose un minimum de modifications d'un équilibrage donné afin de minimiser les investissements nécessaires à la fabrication du nouveau programme de production (Gourgand et al., 2006). Quant au séquençement des véhicules, cela consiste à déterminer l'ordre des véhicules à engager sur la ligne d'assemblage (Solnon et al., 2006).

Ces deux problèmes, très liés, sont souvent traités de manières indépendantes et peu de travaux s'intéressent aux deux problèmes conjointement. Rekiek (2001) propose une méthode itérative en deux temps. Dans un premier temps, la méthode définit un équilibrage satisfaisant toutes les contraintes de la ligne d'assemblage. Dans un deuxième temps, l'efficacité de ce dernier est mesurée en procédant au séquençement d'un programme de production défini initialement. Tant que l'efficacité de l'équilibrage ne correspond pas aux attentes, il faut définir un nouvel équilibrage.

Les postes de travail ayant des véhicules provoquant des pics de charge doivent être suffisamment flexibles pour absorber les variations commerciales, les aléas de production et les interactions de contraintes. Cette flexibilité doit permettre de construire une séquence de véhicules telle que les opérateurs travaillent correctement sans arrêter la ligne de production, ni solliciter l'aide d'un opérateur polyvalent.

Nos travaux concernent la prise en compte de la flexibilité lors de l'équilibrage d'une ligne d'assemblage pour que le séquençement des véhicules soit robuste face aux variations

de production. A notre connaissance et jusqu'à présent, cette problématique n'a pas été abordée dans la littérature.

1.5.4. PLAN DE LA THESE

La première étape a consisté à analyser l'existant, c'est-à-dire, à évaluer la fiabilité des données prévisionnelles, à étudier l'impact du respect des contraintes d'espacement sur la qualité du séquençement dans l'atelier montage et à comprendre le processus de définition de ces contraintes. Le deuxième chapitre synthétise les analyses de terrain qui ont été effectuées. Ces analyses ont permis d'orienter les recherches autour des irrégularités dues au séquençement des véhicules et de la mesure de la flexibilité de la ligne d'assemblage.

Le premier axe de recherche concerne l'identification des besoins de la flexibilité en fonction de l'équilibrage de la ligne d'assemblage. Dans le troisième chapitre, nous décrivons tout d'abord une méthode pour identifier un opérateur en difficulté, c'est-à-dire, un opérateur sollicitant une aide en raison d'une charge de travail trop importante. Puis, cette méthode nous permet de localiser les postes de travail critiques et de définir les contraintes d'espacement les plus appropriées.

Le deuxième axe de recherche est consacré à un phénomène qui perturbe le respect des contraintes d'espacement que nous avons nommé : les interactions de contraintes. Dans le chapitre quatre, nous caractérisons ce phénomène, nous proposons un modèle capable d'approximer le risque de non respects de deux contraintes d'espacement et nous présentons un outil d'aide à l'analyse des interactions de contraintes.

Enfin, pour pouvoir définir la flexibilité juste nécessaire, il est indispensable de connaître la flexibilité disponible. Le chapitre cinq aborde le troisième axe de recherche en définissant une mesure de la flexibilité d'un poste de travail ou d'une contrainte d'espacement.

2. Analyse de l'existant

Dans le premier chapitre, nous avons défini le contexte industriel et scientifique de cette thèse. Rappelons que le bureau des méthodes définit sur certains postes de travail des véhicules qui provoquent un pic de charge. Ce sont des postes sensibles au mix. Pour permettre à ces opérateurs de travailler sans solliciter l'aide d'un opérateur polyvalent, il faut espacer ces véhicules. Cet espacement est assuré en définissant une contrainte d'espacement lors du problème de séquençement. Rappelons aussi que l'idéal serait que ces véhicules soient, tout au long d'une période étudiée (le mois), fabriqués le plus régulièrement possible et de plus en quantité égale aux valeurs données par les prévisions. Nous avons indiqué que la volonté de fabriquer à la commande dans les meilleurs délais engendre 3 phénomènes qui perturbent cet idéal : les erreurs de prévision et les variations entre les différentes journées, la difficulté à espacer régulièrement les véhicules dans une journée et enfin les aléas de production. Après avoir écarté les aléas de production du périmètre de notre étude, il nous reste donc deux phénomènes à analyser : les prévisions et le séquençement.

Dans ce chapitre, nous allons commencer par étudier la fiabilité des données prévisionnelles. Puis, nous étudierons la qualité des séquences de véhicules engagées au montage en prenant en compte le point de vue de la coordination de production et le point de vue du bureau des méthodes. Enfin, pour comprendre comment les contraintes d'espacement sont définies, nous décrirons le processus de négociation chez PSA Peugeot Citroën qui aboutit aux contraintes d'espacement appliquées dans l'ordonnancement des véhicules.

2.1. LA FIABILITE DES DONNEES PREVISIONNELLES

La première étude que nous avons entreprise consiste à analyser la fiabilité des données prévisionnelles et à vérifier que les variations réelles étaient couvertes par le niveau de flexibilité demandée au montage.

Tout d'abord, nous décrirons les données utilisées. Puis, nous expliciterons l'indicateur de fiabilité utilisé et nous présenterons l'analyse des données mensuelles, hebdomadaires et quotidiennes. Nous conclurons par une synthèse générale.

2.1.1. LES DONNEES DE L'ANALYSE STATISTIQUE

2.1.1.1. LES DONNEES PREVISIONNELLES

Au début de chaque mois, la direction commerciale actualise les données prévisionnelles. Ces données sont réparties par site de production. Puis, elles leur sont transmises. A l'aide de ces informations, les sites de production dimensionnent leurs moyens de production.

Ces données contiennent pour chaque type de véhicules les quantités à produire sur les 4 prochains mois à partir du mois suivant. Les quantités des deux premiers mois sont réparties par semaine. Un type de véhicule correspond à une description détaillée d'un véhicule, *i.e.* il possède les mêmes informations qu'un ordre de fabrication, même si ce n'est pas une commande client. Nous parlerons également dans la suite du document de « programme prévisionnel ». A l'aide de cette description détaillée et du critère d'une contrainte d'espacement, il est possible d'évaluer le nombre de véhicules soumis au critère d'une contrainte d'espacement sur le mois (volume utilisé pour le calcul de la marge de sécurisation) ou sur les différentes semaines.

Dans notre travail, nous nous focaliserons uniquement sur les données du premier mois (Les volumes du premier mois représentent le programme ferme et ont une valeur de contrat de préparation pour l'usine et ses fournisseurs). Ainsi, les données prévisionnelles reçues le 1^{er} mai correspondront aux données prévisionnelles mensuelles et hebdomadaires du mois de Juin (Tableau 2.1). Dans ce tableau, nous avons représenté pour chaque description détaillée d'un type de véhicule, le nombre prévisionnel hebdomadaire dans les colonnes « S23 », « S24 », « S25 » et « S26 » et le nombre prévisionnel mensuel (somme des prévisions hebdomadaires) dans la colonne « JUIN ».

Type de véhicules	S23	S24	S25	S26	JUIN
Description détaillée du véhicule type 1	1	0	0	0	1
Description détaillée du véhicule type 2	0	1	0	0	1
...
Description détaillée du véhicule type n-1	0	0	2	2	4
Description détaillée du véhicule type n	2	1	0	0	3

Tableau 2.1 : Exemple de données prévisionnelles pour un site au mois de Juin 2006

2.1.1.2. LES SITES DE PRODUCTION

L'analyse statistique s'est déroulée sur une période s'étalant de début Septembre 2003 à fin Juillet 2004. Elle a été réalisée à partir des données prévisionnelles et des informations de production recueillies sur les sites de production de :

- **Poissy** : fabrication de la 206 sur 2 lignes de production,
- **Rennes** : fabrication de la 407, Xsara et C5 sur 3 lignes de production dédiées à chacun des modèles,
- **Sevel Nord** : fabrication de Monospaces et d'utilitaires de 4 marques (FIAT, LANCIA, PEUGEOT et CITROEN) sur une seule ligne de production (soit 7 modèles différents car LANCIA ne vend pas d'utilitaires)
- **Sochaux** : fabrication de la 307, 406 et 307 sur 2 lignes montage.

Durant cette période, PSA Peugeot Citroën a produit plus d'un million de véhicules⁸ sur les 4 sites étudiés soit 30% de la production totale du groupe. Le Tableau 2.2 présente la répartition des volumes produits par modèle et par site de production.

Site	Véhicules	Volumes	Lignes
POISSY	206	307515	L1 & L2
	1007	442	L1
	Total	307957	
RENNES	C5	78002	L1
	407	78719	L2
	Xsara	62563	L3
	Total	219284	
SEVEL NORD	Utilitaire	82316	L1
	Monospace	71900	L1
	Total	154216	
SOCHAUX	307	324430	L1 & L2
	406	47036	L2
	607	18379	L2
	Total	389845	

Tableau 2.2 : Volumes produits sur les sites de production analysés

2.1.1.3. LES CONTRAINTES D'ESPACEMENT

Sur chacun des sites de production, les contraintes d'espacement qui ont été appliquées ont souvent été les mêmes durant toute la période. En effet, dans la pratique, elles sont souvent reportées systématiquement d'un mois sur l'autre. Seuls les ratios sont adaptés en fonction du volume prévisionnel à produire ce que confirme la figure 2.1.

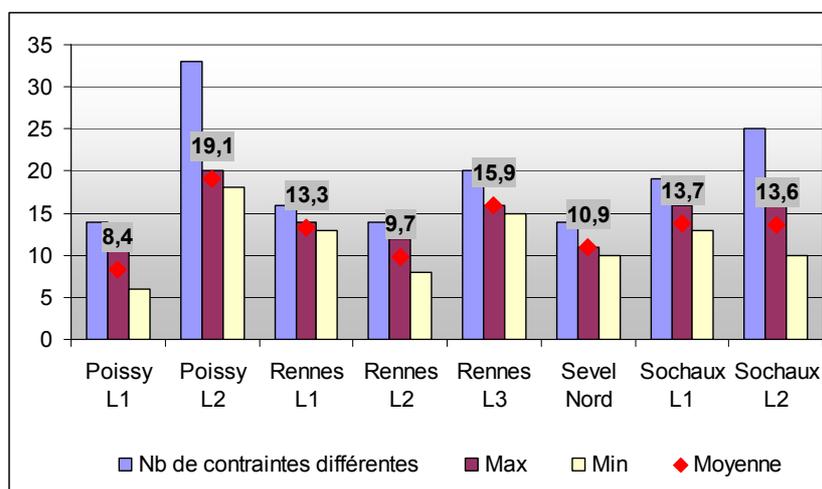


Figure 2.1 : Evolution des critères des contraintes d'espacement

La figure 2.1 représente l'évolution du nombre de contraintes d'espacement pour cette période. La barre bleue représente le nombre de contraintes différentes définies sur les 12 mois. La barre mauve (resp. beige) représente le nombre maximal (resp. minimal) de

⁸ Exactement : 1.071.302 véhicules

contraintes négociées pour un mois. Le point rouge représente le nombre moyen de contraintes négociées.

Le nombre de contraintes d'espacement a peu évolué sur cette année à l'exception de Poissy L2 et de Sochaux L2. Pour Poissy L2, le bureau des méthodes, afin de réduire artificiellement le nombre de contraintes d'espacement, regroupe régulièrement des contraintes représentant des faibles volumes. Sur la ligne L2 de Sochaux, au cours de cette étude, la fabrication de la 406 a été arrêtée réduisant, de fait, le nombre de contraintes d'espacement.

2.1.2. LA FIABILITE DES CONTRAINTES D'ESPACEMENT

La flexibilité demandée au montage repose sur les données prévisionnelles. Des données prévisionnelles peu fiables peuvent fausser complètement la flexibilité demandée. Par conséquent, dans cette partie, nous allons estimer la fiabilité des données prévisionnelles transmises par la direction commerciale.

2.1.2.1. LE TAUX DE FIABILITE

Par abus de langage, nous parlerons du volume produit ou prévu d'une contrainte d'espacement comme étant le nombre de véhicules produits ou prévus répondant au critère de la contrainte d'espacement.

Pour mesurer l'écart entre le volume produit et prévu des contraintes d'espacement, nous avons utilisé le taux de fiabilité, T_{fc} , calculé par l'équation (2.1). Cet indicateur vaut 100% quand le volume prévu d'une contrainte d'espacement vaut exactement le volume produit. Plus l'écart est grand, et plus cet indicateur sera faible. Il vaut 0% si un des deux volumes est nul.

$$T_{fc} = \frac{MIN(Volume_{produit}, Volume_{prévu})}{MAX(Volume_{produit}, Volume_{prévu})} \quad (2.1)$$

Nous avons décliné cet indicateur en fonction de la taille des échantillons pris en compte : mois, semaine et jour. Le taux de fiabilité mensuelle et hebdomadaire d'une contrainte d'espacement mesure l'écart entre les volumes indiqués dans les données prévisionnelles (Tableau 2.1) et les volumes réellement produits sur ces périodes. Le taux de fiabilité quotidienne d'une contrainte d'espacement mesure l'écart entre la consommation moyenne journalière, utilisée pour évaluer la marge de sécurisation, et le volume produit chaque jour. Cet écart est calculé en fonction du taux de la consommation moyenne journalière et le taux de véhicules produits chaque jour.

Le tableau 2.3 illustre, par l'exemple, le calcul de cet indicateur pour chaque mois de production de la période étudiée. Ce tableau représente le calcul du taux de fiabilité mensuelle de la contrainte d'espacement « 3 Portes » (3P) à Poissy.

<i>Période</i>	<i>Prévisions</i>	<i>Production</i>	<i>Prévu et Produit MIN(Prévisions,Production)</i>	<i>Prévu ou Produit MAX(Prévision,Production)</i>	T_{fc}
09/2003	10908	10080	10080	10908	92,41%
10/2003	10635	10804	10635	10804	98,44%
11/2003	7334	7621	7334	7621	96,23%
...
05/2004	5776	5864	5776	5864	98,50%
06/2004	7540	7667	7540	7667	98,34%
07/2004	8940	9067	8940	9067	98,60%

Tableau 2.3 : Fiabilité des prévisions mensuelles de « 3P » sur le site de Poissy (L1 et L2)

2.1.2.2. LA FIABILITE MENSUELLE

La flexibilité demandée au montage repose sur les données prévisionnelles mensuelles. Rappelons que le volume des véhicules soumis au critère d'une contrainte d'espacement pour une journée est obtenu à partir de cette donnée en supposant une répartition uniforme sur tous les jours du mois à venir. La fiabilité de ces informations est donc nécessaire pour ajuster au mieux la flexibilité.

Pour mesurer cette fiabilité, nous avons évalué le taux de fiabilité mensuelle des volumes liés aux contraintes d'espacement (équation 2.1) pour chaque contrainte d'espacement négociée et pour chaque mois de production observé. Puis, nous les avons regroupées en fonction de leur taux de fiabilité mensuelle par tranche de 10% et par ligne d'assemblage (Figure 2.2). « TOUT SITE » considère toutes les lignes d'assemblage simultanément.

Fiabilité mensuelle des contraintes d'espace

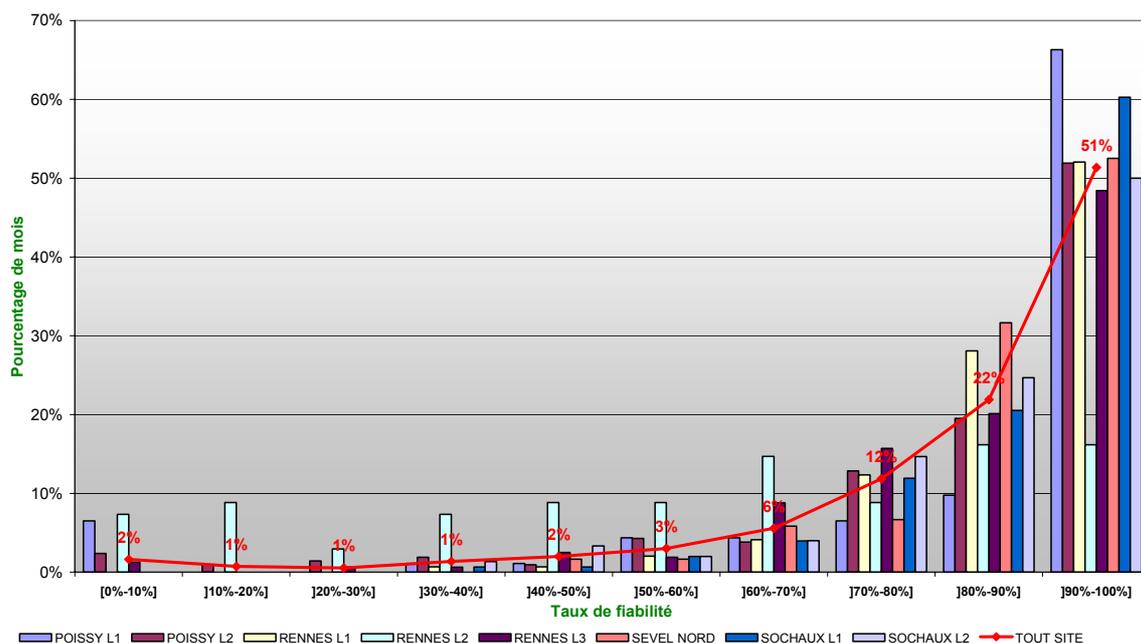


Figure 2.2 : Fiabilité mensuelle des contraintes d'espace

Comme nous le remarquons dans la figure 2.2, 51% des contraintes d'espace exprimées ont un volume fiable à plus de 90%. Et, 85% (51+22+12) ont un volume fiable à plus de 70%.

2.1.2.3. LA FIABILITE HEBDOMADAIRE

Les données prévisionnelles contiennent les volumes prévus répartis par semaine (Tableau 2.1). Ces informations ne sont ni exploitées par la coordination de production, ni par le bureau des méthodes pour prévoir les éventuels pics de production. Or, comme nous le montrons ci-après, l'analyse de ces informations pourrait présenter un intérêt.

Pour mesurer la fiabilité de ces informations, nous avons évalué le taux de fiabilité hebdomadaire de chaque contrainte d'espace selon l'équation (2.1). Comme pour la fiabilité mensuelle des contraintes d'espace, nous les avons regroupé par tranche de 10% et par ligne d'assemblage (Figure 2.3).

Fiabilité hebdomadaire des contraintes d'espace

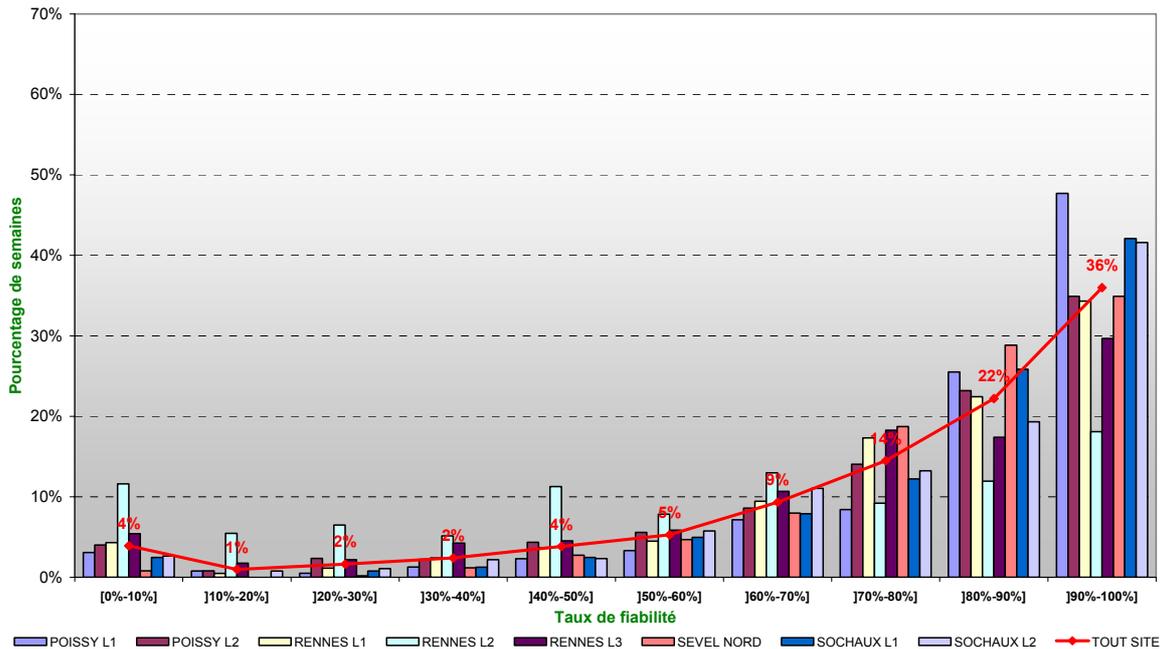


Figure 2.3 : Fiabilité hebdomadaire des contraintes d'espace

Le taux de contraintes d'espace fiable à plus de 90% passe de 51% à 36%. Et, 72% (36+22+14) des contraintes d'espace sont fiables à plus de 70% contre 85% pour le cas mensuel étudié précédemment.

En regardant de plus près les données, nous avons constaté que l'écart entre la fiabilité mensuelle et la fiabilité hebdomadaire peut venir de quelques contraintes d'espace particulières. Ces contraintes d'espace nécessitent la mise en place de moyens spécifiques lourds comme celles pesant sur les véhicules de la police et de la gendarmerie. L'équilibrage est réalisé une fois par mois et le bureau des méthodes alloue les moyens pour un mois complet. Par conséquent et pour exploiter au mieux les moyens mis en œuvre, il souhaite lisser mensuellement la fabrication de ces véhicules. Or, ce mode de fonctionnement est contradictoire avec les besoins de la direction commerciale. En effet, regrouper la fabrication de ces véhicules sur une courte période (de l'ordre d'une journée ou d'une semaine) permet de réaliser des économies sur le stockage et sur la livraison des véhicules.

L'analyse de ces données prévisionnelles hebdomadaires pourrait éventuellement permettre au bureau des méthodes une meilleure planification de moyens spécifiques liés à une charge de travail occasionnelle identifiée par la direction commerciale.

2.1.2.4. LA FIABILITE QUOTIDIENNE

Le dimensionnement de la marge de sécurisation est réalisée en fonction de la consommation moyenne journalière. Pour chacune des contraintes d'espace négociées et chaque jour de production de la période étudiée, nous avons évalué le taux de fiabilité quotidienne des contraintes d'espace (équation 2.1). Puis, nous les avons à nouveau regroupées en fonction de leur taux de fiabilité quotidienne par tranche de 10% et par ligne d'assemblage (Figure 2.4).

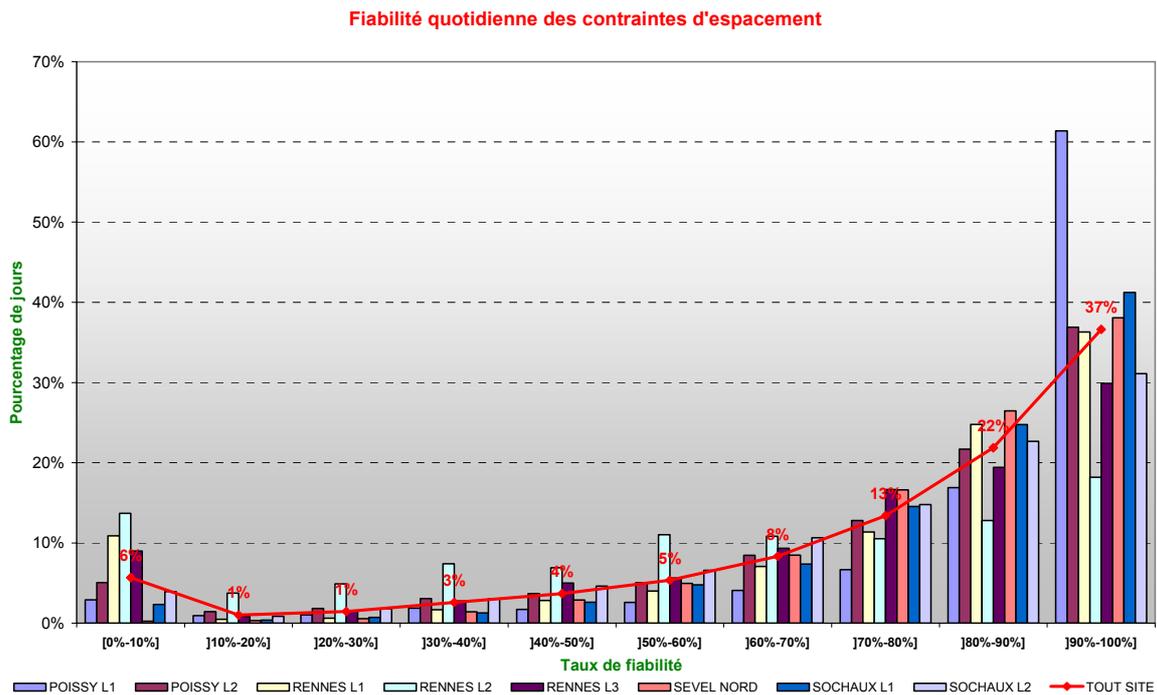


Figure 2.4 : Fiabilité quotidienne des contraintes d'espace

A l'exception de la ligne d'assemblage L2 de Rennes, la fiabilité quotidienne et hebdomadaire des contraintes d'espace suivent la même tendance comme le montrent les représentations graphiques en barre des figures 2.3 et 2.4 (37% et 36% pour les contraintes d'espace fiables à plus de 90% ; 73% et 72% pour les contraintes d'espace fiables à plus de 70%).

2.1.3. LE RESPECT DES MARGES DE SECURISATION

L'analyse de la fiabilité des données prévisionnelles mensuelles, hebdomadaires et quotidiennes nous montre que les informations présentes dans les données prévisionnelles sont d'assez bonnes qualités. Néanmoins, une bonne fiabilité ne garantit pas forcément le respect de la marge de sécurisation comme nous allons l'illustrer ci-dessous.

Comme les ratios des contraintes d'espacement sont dimensionnés en fonction de la consommation moyenne journalière et de la marge de sécurisation demandée à l'atelier montage, nous allons vérifier que cette marge de sécurisation est suffisante pour absorber les variations dues aux écarts de prévision.

Pour chaque mois de production et chaque contrainte d'espacement négociée, nous avons dénombré le nombre de véhicules prévus dans les données prévisionnelles (Tableau 2.1). Pour chacune de ces valeurs, nous avons calculé la consommation moyenne journalière prévisionnelle. Et, nous avons évalué trois marges de sécurisation selon la loi Hédin (équation 1.2), correspondant à 3 niveaux de flexibilité différents :

- $I_f = 0$: Pas de flexibilité, cela correspond à la consommation moyenne journalière,
- $I_f = 1,5$: Flexibilité offerte au commerce,
- $I_f = 2,5$: Flexibilité demandée au montage.

Pour chaque journée de production de la période étudiée et chacune des contraintes négociées, nous avons comptabilisé le nombre de véhicules produits.

Le nombre de véhicules produits quotidiennement sur une ligne d'assemblage fluctue d'une journée sur l'autre. Ce nombre ne correspond pas exactement au nombre moyen de véhicules prévus quotidiennement. Pour ces deux raisons, nous avons décidé de comparer le taux de véhicules produits quotidiennement pour chaque contrainte aux taux des trois marges de sécurisation. Par exemple, au mois de Septembre 2003 à Poissy sur la ligne de montage L1, les équilibreurs ont négocié une contrainte d'espacement portant sur les véhicules de type 206 ayant la silhouette 5 Portes. 9916 véhicules de ce type étaient décrits dans les données prévisionnelles sur un nombre de véhicules total de 18337 véhicules. La ligne de montage L1 de Poissy a fonctionné, ce mois-là, 20 jours. Par jour, cela représente une moyenne de $9916/20 \cong 495$ véhicules de type 206 avec la silhouette 5 Portes sur un total de $18337/20 \cong 917$ véhicules.

Les 3 marges de sécurisation sont :

- Pour $I_f = 0$, $Q_{Prevision} = 495 + 0 * \sqrt{2 * 495 * \left(1 - \frac{495}{917}\right)} = 495$, soit $Prevision = \frac{495}{917} = 53,98\%$
- Pour $I_f = 1,5$, $Q_{Commerce} = 495 + 1,5 * \sqrt{2 * 495 * \left(1 - \frac{495}{917}\right)} = 527$, soit $Commerce = \frac{527}{917} = 57,47\%$
- Pour $I_f = 2,5$, $Q_{Montage} = 495 + 2,5 * \sqrt{2 * 495 * \left(1 - \frac{495}{917}\right)} = 548$, soit $Montage = \frac{548}{917} = 59,76\%$

Par exemple, le Lundi 1^{er} Septembre 2003 à Poissy sur la ligne de montage L1, 606 véhicules de type 206 avec la silhouette 5 Portes ont été produits pour un total de 915 véhicules, soit $606/915 = 66,23\%$. En comparant cette valeur aux trois marges de sécurisation calculées précédemment, nous constatons que le volume des véhicules produits cette journée-là n'est pas absorbé par la marge de sécurisation correspondant à la flexibilité demandée au montage malgré une bonne fiabilité de $\frac{53.98}{66.23} = 81.50\%$.

Le tableau 2.4 synthétise le résultat de cette comparaison par site de production, par ligne de montage et en fonction de la marge de sécurisation calculée. Par exemple, pour le site de production de Poissy, sur la ligne de montage L1, 59% des 2042 situations analysées n'excèdent pas la consommation moyenne journalière, 90% n'excèdent pas la flexibilité offerte au commerce et 96% n'excèdent pas la flexibilité demandée au montage. Les 2042 situations correspondent au nombre de couples (jour de production, contrainte d'espacement négociée) sur le site de production de Poissy de début Septembre 2003 à fin Juillet 2004.

		Prévision $I_f = 0$	Commerce $I_f = 1,5$	Montage $I_f = 2,5$	Total
POISSY	L1	59%	90%	96%	2042
	L2	52%	83%	94%	4696
RENNES	L1	49%	88%	98%	3099
	L2	72%	87%	93%	1578
	L3	51%	89%	96%	3326
SEVEL NORD	L1	56%	87%	95%	2542
SOCHAUX	L1	57%	81%	91%	3367
	L2	57%	83%	91%	3356
Global		55%	85%	94%	24006

Tableau 2.4 : Pourcentage de situations respectant les marges

Globalement, la flexibilité demandée au montage couvre 94% des variations quotidiennes. Cette marge de sécurisation est donc suffisante pour couvrir les besoins de cette composante de la flexibilité.

2.1.4. CONCLUSION

Nous pouvons conclure que la fiabilité des données prévisionnelles et le calcul de la marge de sécurisation à l'aide de la Loi Hédin sont suffisants pour couvrir les variations dues aux écarts de prévision. Par conséquent, ces éléments peuvent être utilisés pour dimensionner les postes de travail d'une ligne d'assemblage.

2.2. LA QUALITE DES SEQUENCES DE VEHICULES

La flexibilité demandée au montage doit absorber trois phénomènes : les erreurs de prévisions, les difficultés de séquençement et les aléas de production. Après avoir écarté dans le premier chapitre les aléas de production, nous venons de montrer dans la partie précédente que la flexibilité demandée au montage est suffisante pour couvrir les erreurs de prévisions. Dans cette partie, nous allons analyser la qualité du séquençement des véhicules pour essayer d'identifier les besoins liés à la difficulté du séquençement des véhicules.

Le bureau des méthodes définit des contraintes d'espacement pour lisser les pics de charge des opérateurs. Le respect de ces contraintes d'espacement devrait donc permettre d'éviter qu'un opérateur ne se retrouve en difficulté. Pour vérifier cet élément, nous avons mesuré la qualité des séquences de véhicules engagées au montage selon deux points de vue : celui de la coordination de production (qui s'intéresse aux respects des contraintes) et celui du bureau des méthodes (qui s'intéresse à la charge des opérateurs). Ensuite, nous avons évalué la corrélation entre ces deux mesures. Pour terminer, nous l'avons complété par une observation sur quelques postes de travail et nous avons mis en évidence quelques incohérences (Thomas, 2005).

Les informations utilisées dans cette section proviennent de la ligne d'assemblage L2 du site de production de Poissy en mois d'Avril 2005. Cette ligne d'assemblage fabriquait la 206 depuis plus de 5 ans. Cette longévité aurait dû faciliter l'identification des problèmes sur la ligne d'assemblage. Les données sont extraites d'un système d'appel, nommé SPELEO⁹, qui informe les opérateurs polyvalents lorsqu'une difficulté sur un poste de travail est identifiée.

2.2.1. LA COORDINATION DE PRODUCTION

La coordination de production s'engage à respecter les contraintes d'espacement. Par conséquent, la qualité d'une liste de véhicules est mesurée en fonction du nombre de non respects des contraintes d'espacement. Si une liste ne contient aucun non respect, elle est considérée comme excellente.

⁹ Système pour les Postes EnLignés, leur Exécution et leur Optimisation

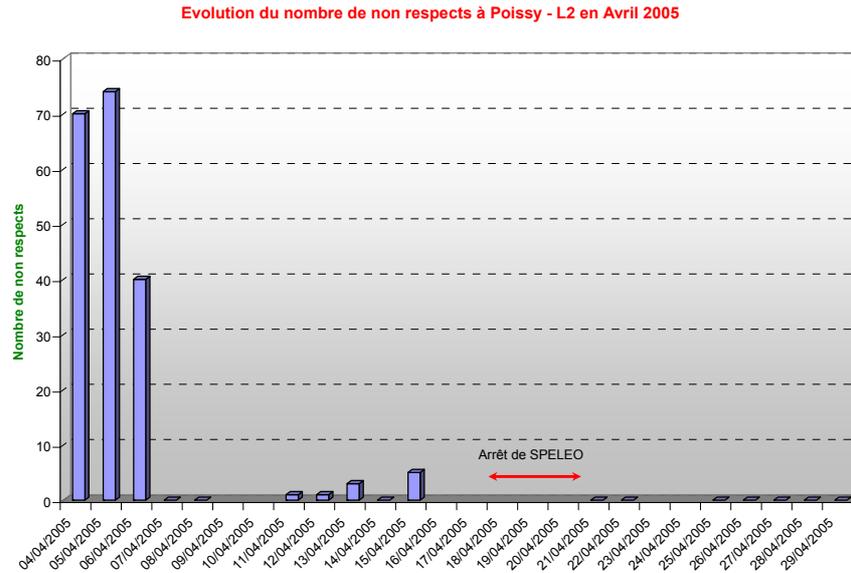


Figure 2.5 : Evolution du nombre de non respects à Poissy – L2 en Avril 2005

La figure 2.5 représente pour chaque jour du mois d’Avril 2005 le nombre de non respects relevés sur la ligne d’assemblage L2 de Poissy. Les 3 premiers jours du mois sont marqués par un grand nombre de non respects¹⁰. Et, quelques non respects apparaissent également à la mi-avril. Sinon, le nombre de non respects est nul pour les autres jours. Donc, hormis les premiers jours, les contraintes d’espace sont globalement très bien respectées par la coordination de production.

Nous noterons que les 18, 19 et 20 avril ont été marqués par un arrêt pour maintenance de l’application SPELEO. L’absence de non respects sur la figure 2.5 pour ces 3 jours n’est donc pas significative.

2.2.2. L’ATELIER MONTAGE

Le bureau des méthodes s’engage à dimensionner les moyens de production pour absorber la flexibilité demandée. Par conséquent, la qualité d’une liste de véhicules est mesurée en fonction du nombre de fois qu’un opérateur polyvalent a été sollicité, c’est-à-dire, en fonction du nombre de fois que l’application SPELEO a déclenché une alerte. Si une liste ne contient aucune alerte, elle est considérée comme excellente.

Le principe du calcul d’une alerte repose sur un principe d’organisation prôné par le projet APOLO. Un véhicule provoquant un pic de charge sur un poste de travail doit être absorbé au pire par deux véhicules sans pic de charge qui l’encadre. La modélisation d’une alerte utilisée dans SPELEO sera abordée plus en détail dans le chapitre 3.

¹⁰ Malheureusement, nous n’avons pas réussi à en connaître la cause.

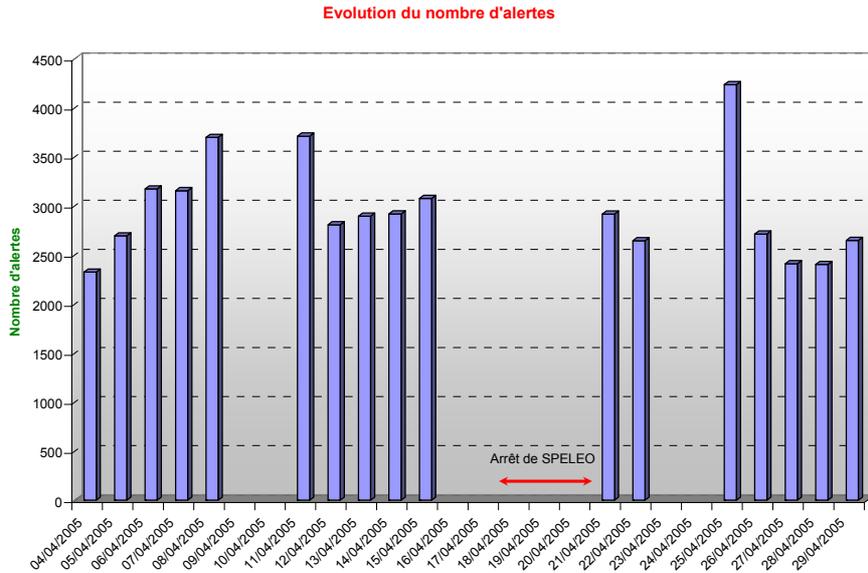


Figure 2.6 : Evolution du nombre d'alertes à Poissy – L2 en Avril 2005

Normalement, le respect des contraintes industrielles, décrit par la figure 2.5, doit conduire à un nombre très faible d'alertes. Or, la figure 2.6, représentant le nombre d'alertes relevées chaque jour sur le site de production de Poissy et la ligne d'assemblage L2 pour le même mois d'Avril 2005, montre un nombre moyen d'alertes quotidiennes très élevé (plus de 2000 par jour travaillé, soit environ 3 alertes par véhicule). Tout comme sur la figure 2.5, l'arrêt de l'application SPELEO explique l'absence d'alertes sur la figure 2.6.

Comme nous avons trouvé ce nombre extrêmement élevé, nous l'avons comparé aux sites de production de Sevel Nord et de Madrid. Nous avons constaté que c'est à Poissy qu'il est le plus élevé mais qu'il est également élevé sur les deux autres sites. A Sevel Nord, nous comptons pour la même période un peu plus d'une alerte par véhicule, et, à Madrid, environ une alerte pour deux véhicules ce qui reste encore important. Mais, le site de Poissy nous a semblé le plus emblématique, et, pour cette raison, nous avons complété cette analyse statistique par une observation des postes de travail de ce site occasionnant le plus d'alertes afin d'évaluer la cohérence de ces mesures.

La journée du 14 Avril comptait 2918 alertes réparties sur 78 postes parmi les 211 postes de la ligne d'assemblage L2 de Poissy (Figure 2.7). Et, seulement 9 de ces postes de travail concentraient la moitié des alertes. L'observation de ces postes montre des incohérences que nous développons dans la partie suivante.

Répartition des alertes par poste de travail (14/04/2005)

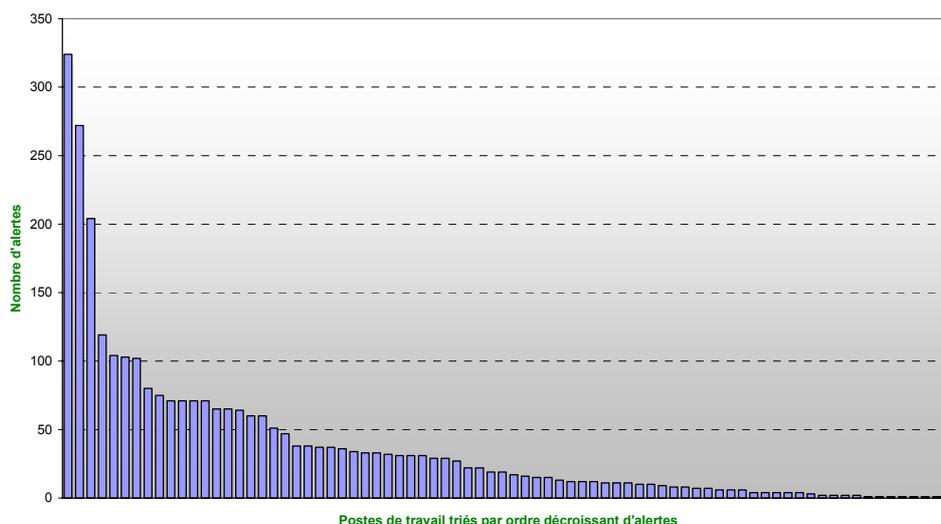


Figure 2.7 : Répartition des alertes par poste à Poissy – L2 le 14/04/2005

2.2.3. LES INCOHERENCES

L'application SPELEO prévient entre 15 et 30 minutes à l'avance les opérateurs polyvalents qu'un opérateur sera en difficulté pour un véhicule donné. Normalement, ce délai doit permettre aux opérateurs polyvalents de planifier leurs interventions. Or, nous avons constaté que les équilibreur (utilisateurs de l'application SPELEO) avaient désactivé la transmission des alertes car les renseignements que cette application fournissait ne coïncidaient pas avec les difficultés des opérateurs. Les alertes, très fréquentes, étaient trop souvent injustifiées.

En observant les 9 postes produisant le plus d'alertes le 14 Avril 2005 à Poissy sur la ligne L2, nous montrerons que la modélisation correspondant à l'identification d'un opérateur en difficulté, *i.e.* le déclenchement d'une alerte, est défaillante. Puis, une analyse croisée entre les alertes et les non respects des contraintes montrera que ces mesures ne sont pas corrélées.

2.2.3.1. SYNTHÈSE DE L'OBSERVATION DES POSTES

Sur le site de Poissy, nous avons réalisé une étude approfondie des postes de travail générant le plus d'alertes le 14 Avril 2005 pour comprendre si les alertes identifient réellement un problème terrain. De cette analyse, nous avons identifié 3 types de postes de travail illustrés par les exemples suivants : Air bag latéral, Câbles et tuyaux de frein et Support ABS.

2.2.3.1.1. AIR BAG LATERAL

Pour ce poste de travail, l'opérateur disposait de deux schémas chronologiques de poste : un pour la pose de la poignée de maintien et un autre pour la pose de la poignée de maintien et la fixation de l'air bag latéral. Le premier schéma nécessitait, pour l'opérateur, un temps de traitement inférieur au temps cycle. Le deuxième schéma nécessitait un temps de traitement supérieur au temps cycle. Le premier permettait à l'opérateur de récupérer facilement un enchaînement de 4 véhicules avec un air bag latéral.

Comme l'option Air Bag Latéral n'était pas soumise à une contrainte d'espacement, l'opérateur était régulièrement en difficulté car les successions de 5 ou plus de véhicules avec un air bag latéral étaient fréquents. Pour le soulager, son chef d'équipe avait affecté un opérateur polyvalent à la surveillance du poste de travail. Dès que l'opérateur affecté au poste de travail franchissait une ligne « virtuelle », matérialisée par un repère visuel comme un poteau, l'opérateur polyvalent intervenait et traitait immédiatement le véhicule suivant.

Suite à cette analyse, la pose d'une contrainte d'espacement avec un ratio de 4/5 sur les Air Bag au mois de Juin 2005 a libéré définitivement l'opérateur polyvalent et a lissé la charge de travail de 3 autres postes de travail. Alors, pourquoi ne pas avoir défini cette contrainte d'espacement plus tôt ?

En analysant le comportement de SPELEO avant et après la pose de cette contrainte d'espacement, nous n'avons pas constaté d'amélioration. En effet, même si le nombre d'alertes avait diminué, il est quand même resté très élevé. La modélisation des alertes est-elle défectueuse ?

2.2.3.1.2. SUPPORT ABS

L'opérateur avait un établi sur lequel il assemblait le dispositif du frein ABS. Puis, après avoir assemblé le dispositif, l'opérateur devait se rendre sur la ligne d'assemblage pour fixer le dispositif sur le véhicule. Normalement, en analysant la charge de travail de l'opérateur, nous avons constaté qu'il était occupé à plus de 95% de son temps de travail. Il disposait de plusieurs schémas chronologiques liés aux différents modèles de frein ABS. Tous étaient proche du temps cycle (soit légèrement au dessus, soit légèrement en dessous). Sans contrainte d'espacement définie pour les modèles qui provoquent un pic de charge, l'application SPELEO déclenchait de nombreuses alertes laissant supposer que l'opérateur était souvent en difficulté.

Or, l'opérateur n'était jamais en difficulté car d'une part, l'opérateur traitait les véhicules par lot et, d'autre part, sans gêner les autres opérateurs, il disposait d'un espace de

travail contenant 9 pas de travail. Le traitement par lot adopté par l'opérateur n'est pas une pratique recommandée car elle ne permet pas à l'opérateur de se concentrer sur le véhicule courant. Les risques de défaut qualité, comme l'inversion de modèles, sont importants.

2.2.3.1.3. CABLES ET TUYAUX DE FREIN

L'opérateur devait fixer au soubassement du véhicule des câbles et des tuyaux de frein à l'aide d'une visseuse asservie. La visseuse asservie était fixée par un câble en bord de ligne ce qui limitait les déplacements de l'opérateur. Pour ce poste de travail, la charge de travail de chaque véhicule était homogène mais était régulièrement légèrement au-dessus du temps cycle. Comme pour l'option air bag latéral, ce n'était pas l'importance des pics de charge mais le cumul de ces pics de charge qui pénalisait l'opérateur. Contrairement à l'option Air Bag Latéral, l'opérateur ne pouvait pas bénéficier de l'aide d'un opérateur polyvalent car le poste de travail n'était pas équipé d'une deuxième visseuse.

Par conséquent, en pratique et en l'absence d'une contrainte d'espacement, ce poste de travail était dédié aux opérateurs très habiles afin de ne pas prendre de retard.

2.2.3.1.4. EN RESUME

Pour qu'un opérateur ne soit pas en difficulté, nous devons, tout d'abord, définir des contraintes d'espacement adaptées (Air Bag Latéral). Pour anticiper un opérateur en difficulté, nous devons disposer d'informations fiables. L'opérateur doit respecter la gamme de travail (Support ABS). Enfin, les temps de traitement doivent être réalistes (Câbles et tuyaux de frein).

Ces observations nous ont également montré que la modélisation d'un opérateur en difficulté dans SPELEO n'est pas adapté (Air Bag Latéral et Câbles et tuyaux de frein). Cette mauvaise adaptation semble être à l'origine du débranchement fréquent de l'application SPELEO par les équilibreurs. Nous décrivons cette modélisation au début du chapitre 3.

Malheureusement, ces constats ne sont pas isolés. En effet, nous avons remarqué les mêmes phénomènes sur les sites de production de Sevel Nord et de Sochaux.

2.2.3.2. ANALYSE CROISEE ENTRE LES ALERTES ET LES NON RESPECTS

Les observations que nous avons réalisées sur quelques postes à Poissy sont corroborées par l'étude de la corrélation entre le nombre d'alertes et le nombre de non respects représentée par la figure 2.8. Cette figure représente la superposition des figures 2.5 et 2.6. Elle montre clairement le manque de corrélation comme le confirme le coefficient de corrélation avec une valeur de 0.275.

Les premiers jours du mois montrent que le nombre de non respects des contraintes décroît alors que le nombre d’alertes croît. Le 25 Avril, jour avec un fort pic d’alertes, la séquence respecte parfaitement l’ensemble des contraintes.

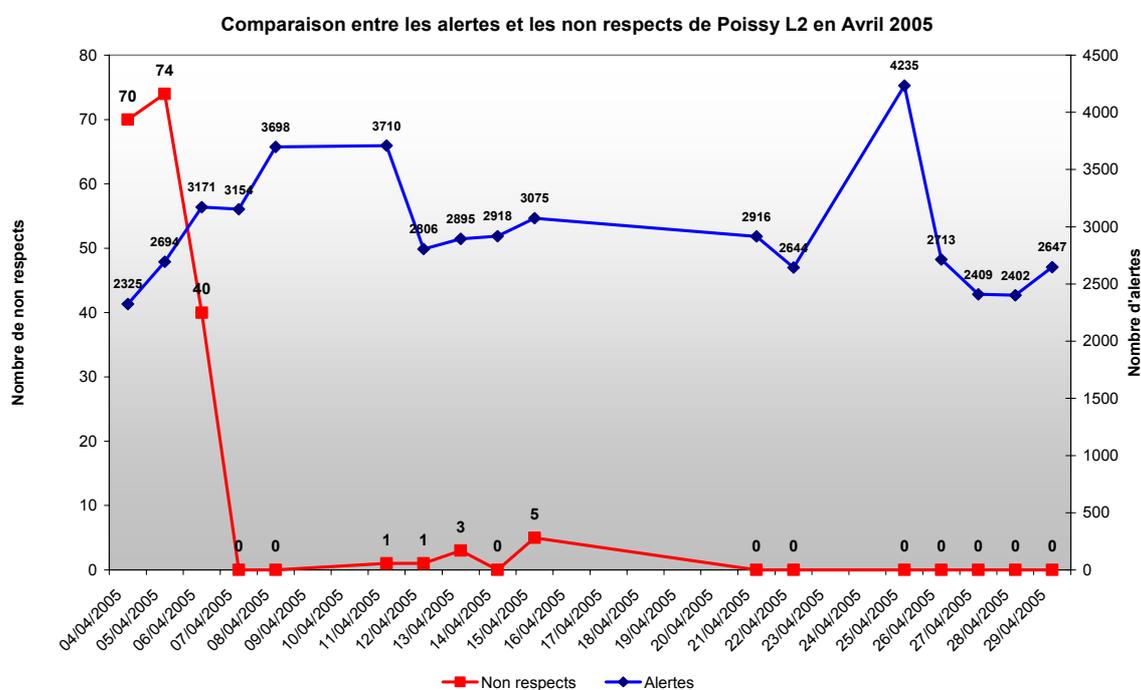


Figure 2.8 : Comparaison des alertes et des non respects de Poissy – L2 en Avril 2005

Cette analyse a également été conduite sur deux autres sites de production : Sevel Nord et Madrid. Le site de Madrid est réputé pour l’application des méthodes préconisées dans les bonnes pratiques du groupe PSA Peugeot Citroën. Comme nous pouvons le constater dans le tableau 2.5, les sites de production étudiés, y compris Madrid, présentent tous la même absence de corrélation entre les alertes et les non respects.

Site de production	Mois	Coefficient de corrélation Alertes / Non respects
Madrid	Mars 2005	-0,030
Poissy L2	Avril 2005	0,275
Sevel Nord	Mars 2005	0,117

Tableau 2.5 : Coefficient de corrélation entre alertes et non respects sur 3 sites de production

Les alertes que nous avons relevées à Poissy ont permis d'identifier 3 classes d'alertes :

- **Non respects avec alertes** : ce cas est nominal ; en effet, un non respect d'une contrainte doit matérialiser un opérateur en difficulté.
- **Non respects sans alertes** : ce cas contre-nature signifie que le non respect ne représente pas un opérateur en difficulté.
- **Alertes sans non respects** : ce cas peut être envisagé si un poste n'est pas pris en compte dans la définition des contraintes, *i.e.* le bureau des méthodes peut estimer que le risque d'avoir un opérateur en difficulté est faible.

Malheureusement, 90% des véhicules ont au moins une alerte. Le nombre de non respects de contraintes d'espacement est faible (moins de 1% des véhicules). Ce qui implique que plus de 99% des véhicules provoquant au moins une alerte ne sont pas signalés par un non respect de contrainte. De plus, cette étude a révélé l'existence de non respects de contraintes ne provoquant pas d'alertes.

Nous avons constaté des cas extrêmes. Le bureau des méthodes définit les contraintes d'espacement. Or, nous avons pu constater qu'un non respect d'une contrainte d'espacement classée comme très importante n'a pas provoqué d'alertes, alors qu'un non respect d'une contrainte d'espacement classée comme peu importante a provoqué 10 alertes. Cet exemple illustre toute l'ambiguïté de la situation.

Par conséquent et à partir de maintenant, nous allons détailler la pratique actuelle de définition des contraintes d'espacement et la difficulté à séquencer les ordres de fabrication.

2.3. L'EQUILIBRAGE D'UNE LIGNE D'ASSEMBLAGE CHEZ PSA

Le processus qui régit l'équilibrage d'une ligne d'assemblage s'effectue en deux étapes successives (Figure 2.9).

La première étape intervient dès la réception des données prévisionnelles transmises par la direction commerciale. L'atelier montage, la gestion des ressources humaines et le bureau des méthodes évaluent ensemble le nombre d'opérateurs nécessaires pour réaliser le programme prévisionnel.

La deuxième étape consiste à rééquilibrer la ligne d'assemblage et à déterminer les contraintes industrielles, *i.e.* étudier l'affectation des opérateurs et des tâches aux postes de travail afin d'absorber le programme de production et de lisser la charge de travail. Nous avons déjà sommairement décrit le rééquilibrage dans le premier chapitre. Mais, en fait, ce rééquilibrage fait l'objet d'une négociation entre le bureau des méthodes et la coordination de

production. Cette négociation a pour objectif de résoudre un conflit sur les moyens à mettre en œuvre pour minimiser les coûts (vision du bureau des méthodes) et satisfaire le client (vision de la coordination de production). Suite à cette négociation, le bureau des méthodes peut éventuellement demander une réévaluation à la hausse du nombre d'opérateurs mais cette procédure doit être pleinement motivée par des gains financiers chiffrés. Par conséquent, elle est rarement appliquée.

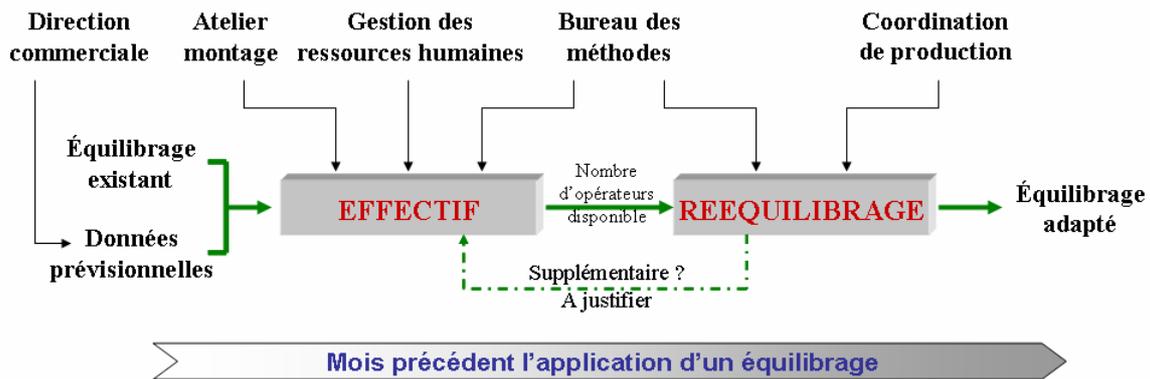


Figure 2.9 : Processus d'équilibrage d'une ligne d'assemblage

2.3.1. LE DIMENSIONNEMENT HUMAIN DE L'ATELIER MONTAGE

Le dimensionnement humain de l'atelier montage, *i.e.* la détermination des effectifs, est la première étape du processus d'équilibrage de ligne d'assemblage. Cette étape fait intervenir 3 acteurs : l'atelier montage, la gestion des ressources humaines et le bureau des méthodes. Elle est déclenchée par l'arrivée des données prévisionnelles et doit être réalisée le plus tôt possible car le recrutement ou la gestion des fins de contrat des intérimaires est un processus nécessitant plusieurs jours, voire quelques semaines.

A partir de la gamme de fabrication des véhicules, la gestion des ressources humaines évalue une charge globale de travail prévisionnelle (équation 2.2). Cette charge globale est convertie en nombre d'opérateurs (équation 2.3). L'atelier montage transmet les prévisions de congés, d'indisponibilités et d'absentéisme à la gestion des ressources humaines. Ces informations servent à majorer le nombre d'opérateurs supplémentaires nécessaires (équation 2.4). Cette majoration doit permettre à l'atelier de faire face au personnel manquant.

$$Ch_g = \sum_{i \in \text{Vehicules}} \sum_{j \in \text{Postes}} V_{m_i} * T_{i,j} \quad (2.2)$$

V_{m_i} : Volume prévisionnel mensuel du véhicule i

$T_{i,j}$: Temps de traitement du véhicule i au poste j

(Les opérations complémentaires ne sont pas prises en compte dans ce temps)

$$Nb_{op} = \left\lceil \frac{Ch_g}{T_{op}} \right\rceil \quad (2.3)$$

T_{op} : Temps de travail d'un opérateur pour le mois considéré
(Un opérateur travaille 441 minutes par jour)

$$Nb_{op_{usine}} = Nb_{op} + Nb_{op_{congés}} + Nb_{op_{indisponible}} + Tx_{op_{absent}} * Nb_{op} \quad (2.4)$$

$Nb_{op_{congés}}$: Nombre d'opérateurs en congés (information de l'atelier montage)

$Nb_{op_{indisponible}}$: Nombre d'opérateurs indisponibles (information de l'atelier montage)

$Tx_{op_{absent}}$: Taux prévisionnel d'absentéisme des opérateurs (Environ 10%)

En théorie, dans le cadre d'une réunion mensuelle entre la gestion des ressources humaines, l'atelier montage et le bureau des méthodes, le nombre d'opérateurs peut être revu à la baisse comme à la hausse par rapport au mois précédent. Mais, en pratique, il est très souvent stable ou revu à la baisse pour des raisons d'économies budgétaires et pour contraindre le bureau des méthodes à améliorer leur rentabilité.

Comme l'évaluation des effectifs disponibles dans l'atelier montage ne prend pas en considération les contraintes industrielles, ni le besoin de flexibilité en volume tel que nous l'avons décrit dans le premier chapitre, nous ne nous attarderons pas sur cet aspect dans la suite du document.

2.3.2. LA NEGOCIATION DES CONTRAINTES D'ESPACEMENT

Après l'évaluation du nombre d'opérateurs, le bureau des méthodes effectue une première répartition des tâches sur les postes de travail selon le nombre d'opérateurs pour répondre au programme prévisionnel décrit dans les données prévisionnelles. Puis, suite aux résultats de la négociation des contraintes d'espacement, il peut être amené à étudier les ajustements nécessaires pour répondre aux exigences négociées. Cette répartition consiste à adapter un équilibre existant en limitant les modifications pour minimiser les investissements nécessaires à sa mise en place. Ces modifications doivent garantir que le respect des contraintes d'espacement permettra de produire, au mieux, le volume prévisionnel des véhicules majoré de la marge de sécurisation.

Le processus de négociation des contraintes d'espacement doit aider à atteindre cet objectif en trouvant un compromis entre les limites des contraintes industrielles et les besoins de la direction commerciale.

2.3.2.1. LE PROCESSUS DE NEGOCIATION DES CONTRAINTES

Le processus de négociation des contraintes (Figure 2.10) se décline sous forme d'un cycle constitué de 4 étapes : préparation, négociation, exécution et animation. Il se déroule sur 2 mois : un mois de préparation de J-30 à J et un mois d'exécution d'un équilibrage de J à J+30. Et, il se répète tous les mois.

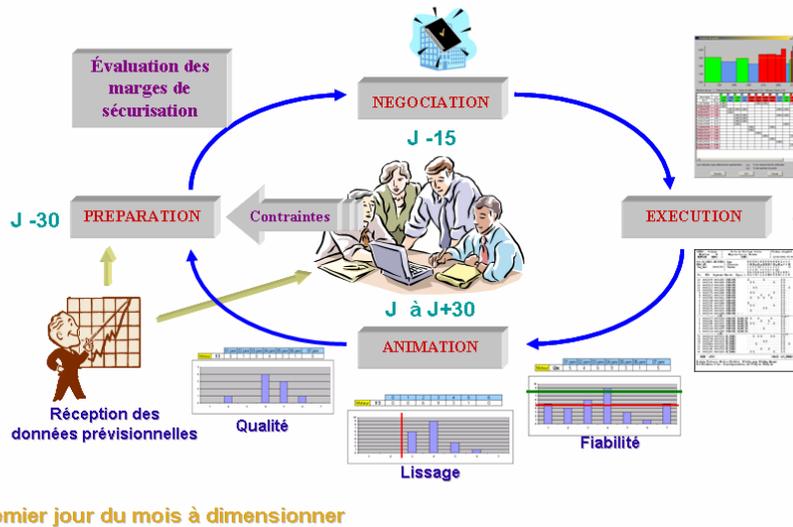


Figure 2.10 : Le processus de négociation des contraintes

2.3.2.2. LES ACTEURS

Les acteurs du processus de négociation des contraintes sont le bureau des méthodes et la coordination de production. Le bureau des méthodes s'engage à dimensionner les moyens de production pour absorber les volumes et les ratios négociés. La coordination de production s'engage à respecter à la fois les volumes et les ratios négociés pour ne pas excéder les moyens mis en œuvre par le bureau des méthodes.

2.3.2.3. LES ETAPES

Chacune des 4 étapes de la figure 2.10 doit répondre aux questions suivantes :

- **La préparation** : A partir des données prévisionnelles, comment peut-on envisager l'organisation de l'atelier montage tout en répartissant la charge de travail des opérateurs ?
- **La négociation** : Quelle répartition des charges de travail et quelles contraintes industrielles doivent être appliquées ?
- **L'exécution** : Comment organiser et mettre en place les moyens de production pour produire ce qui est commandé ?
- **L'animation** : La négociation nous a-t-elle permis d'atteindre nos objectifs ?

2.3.2.3.1. LA PREPARATION

A la réception des données prévisionnelles, le bureau des méthodes négocie le dimensionnement humain. Il identifie les critères des contraintes d'espace et les priorise en les rangeant dans une des catégories suivantes :

- **Les contraintes mineures** sont des contraintes « légères », posées pour faciliter le lissage des ressources ou de la charge de travail. Elles peuvent ne pas être respectées, cela n'est pas trop pénalisant pour l'atelier montage (sauf quand il y a trop de non respects consécutifs),
- **Les contraintes majeures** sont des contraintes qu'il faut respecter. Si l'une d'elles n'est pas respectée, une alarme doit être levée et un moyen d'action adapté doit être mis en place.
- **Les contraintes super-majeures** sont des contraintes qui, quoi qu'il arrive, doivent impérativement être respectées. Tout non-respect de ces contraintes expose l'atelier montage à un risque élevé de non qualité du véhicule ou d'arrêt des installations (comme le cas des poses de toit ouvrant à Sochaux). En général, elles représentent les contraintes définies pour les postes capacitaires.

Ensuite, le bureau des méthodes transmet le critère et la priorité des contraintes d'espace à la coordination de production. Puis, la coordination de production évalue les marges de sécurisation et les ratios à appliquer. La figure 2.11 illustre cette étape. La marge de sécurisation de la contrainte « 307 Break » pour une journée de production, *i.e.* flexibilité demandée à l'atelier montage, est évaluée à 35 véhicules. Et, pour produire les 155 véhicules pouvant être demandés quotidiennement, le ratio qui serait à respecter est évalué à 1/3.

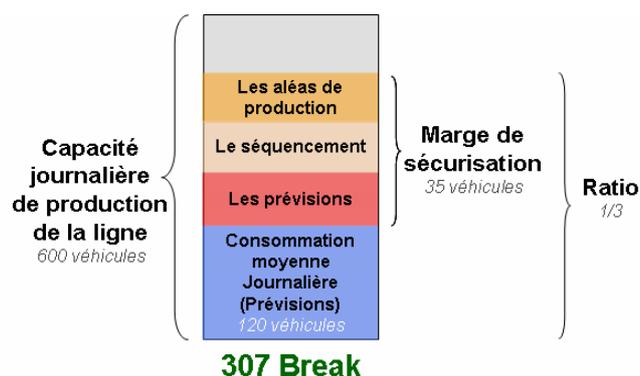


Figure 2.11 : Evaluation de la marge et du ratio de chaque contrainte

Simultanément, le bureau des méthodes étudie les modifications à apporter à la ligne d'assemblage pour prendre en compte les effectifs disponibles et pour lisser la charge de travail des opérateurs.

2.3.2.3.2. LA NEGOCIATION DES CONTRAINTES D'ESPACEMENT

La négociation intervient environ 15 jours avant l'application d'un équilibrage adapté. Elle s'effectue au cours d'une réunion entre le bureau des méthodes et la coordination de production. L'objectif commun des deux protagonistes est de produire les véhicules demandés par le commerce au moindre coût. Mais, la négociation les oppose sur l'évaluation de la marge de sécurisation et le ratio à appliquer pour chacune des contraintes d'espacement.

Pour produire les véhicules demandés par la direction commerciale et construire une séquence de véhicules qui respecte les contraintes industrielles de l'atelier montage, la coordination de production aura tendance à demander une marge de sécurisation plus grande que nécessaire.

Pour lisser la charge de travail et garantir un engagement minimal sur les postes de travail, le bureau des méthodes souhaite minimiser cette marge. En effet, tout d'abord, prendre en compte un volume plus important que celui présent dans les données prévisionnelles risque de trop rapprocher les véhicules provoquant un pic de charge, occasionnant éventuellement l'appel fréquent d'opérateurs polyvalents (figure 2.12). De plus, le renforcement des postes concernés avec un opérateur supplémentaire et/ou la modification de ces postes pour supprimer tout appel présente un investissement très important. Si le choix de réaliser cet investissement est pris, le risque de ne pas utiliser pleinement le potentiel de fabrication de ces postes de travail pourrait être important. Ce qui impliquerait une rentabilité moindre et un surcoût inutile. En revanche ne pas dimensionner suffisamment de marge implique un délai d'attente pour les clients.

Nous illustrons la négociation avec les figures 2.11 et 2.12. La coordination de production demande une contrainte d'espacement avec un ratio 1/3 pour le critère « 307 Break », pour un volume maximal de 155 véhicules (Figure 2.11) avec une production globale de 600 véhicules. D'après les données prévisionnelles et sans marge de sécurisation, *i.e.* 120 véhicules, un ratio 1/5 pourrait suffire.

Pour simplifier, nous décrirons ce qui se passe sur un poste de travail seulement. Avec un ratio 1/5, ce poste de travail nécessite un opérateur seulement. Adapter ce poste de travail pour un ratio 1/3 tout le temps impose la mise en place d'un deuxième opérateur. Or, une solution est de réduire la marge de sécurisation en la passant de 35 à 30 véhicules, ce qui permet de proposer pour le poste de travail un ratio de 1/4 (150/600). Il faudra peut être faire appel de temps en temps à un opérateur polyvalent mais cela pourrait être une solution plus économique (Figure 2.12).

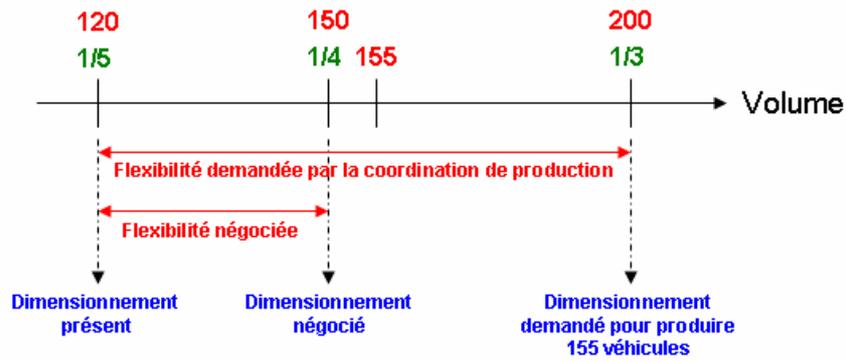


Figure 2.12 : Evaluation de la marge et du ratio de chaque contrainte

La négociation portera, pour cette contrainte, sur un compromis d'ordre économique : faut-il affecter un opérateur en permanence ou prendre le risque de faire appel ponctuellement à un opérateur supplémentaire ?

La réunion de négociation se conclut par l'élaboration d'un contrat entre les deux protagonistes. La coordination de production s'engage à respecter à la fois les volumes et les ratios négociés. Le bureau des méthodes s'engage à dimensionner les moyens de production pour absorber les volumes et les ratios.

Actuellement, selon les sites de production du groupe PSA Peugeot Citroën, les contrats comprennent de 10 à 20 contraintes d'espacement.

2.3.2.3.3. L'EXECUTION

Après la réunion de négociation, le bureau des méthodes étudie les adaptations à apporter pour répondre au contrat jusqu'à 5 jours avant le début du mois (délai nécessaire pour préparer la formation des postes modifiés et former les opérateurs). Ainsi, dès le premier jour du mois, le nouvel équilibre peut être appliqué.

Afin de synchroniser la mise en place du nouvel équilibre et l'engagement des véhicules au montage, la coordination de production applique les contraintes négociées dans le système d'information construisant la LUO 5 jours avant le premier jour du mois. Puis, au premier jour du mois, l'outil informatique de pilotage du stock avant l'atelier montage (Magellan) est mis à jour avec les contraintes négociées afin que l'engagement des véhicules au montage respecte les contraintes négociées.

2.3.2.3.4. L'ANIMATION

La coordination de production suit quotidiennement trois indicateurs pour vérifier si les objectifs fixés sont atteints ou pour éventuellement renégocier les termes du contrat :

- **Qualité** : nombre de non respects des contraintes d'espace négociées,
- **Fiabilité** : écart entre la consommation prévisionnelle et la consommation réelle,
- **Lissage** : étude des écarts entre les véhicules soumis à la même contrainte d'espace.

Rappelons que pour anticiper les besoins de renforts sur un poste de travail, l'atelier montage est équipé d'un système d'appel, nommé SPELEO, informant automatiquement les opérateurs polyvalents lorsqu'une difficulté sur un poste de travail est identifiée. Elle se matérialise par les points rouges représentant les appels sur l'écran de contrôle (figure 2.13).

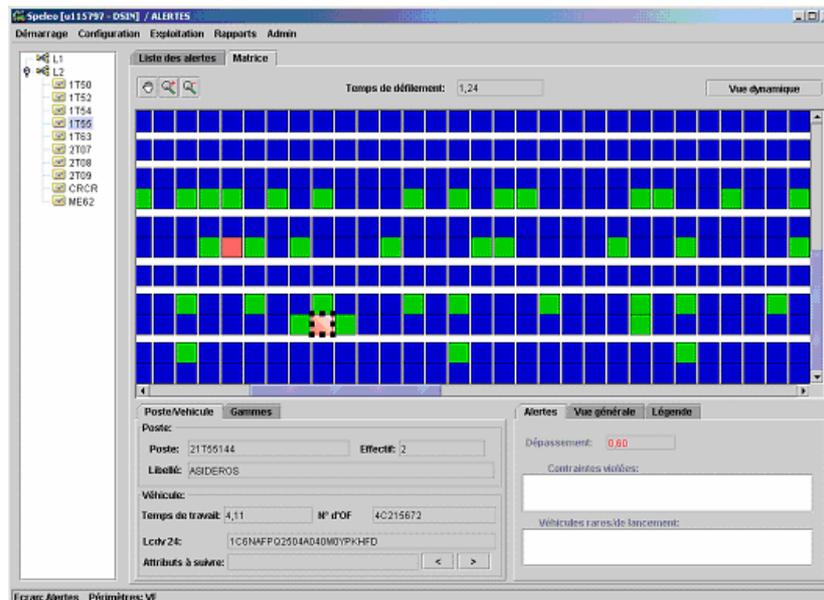


Figure 2.13 : SPELEO

Le résultat de ces indicateurs et le nombre d'alertes déclenchées peuvent être utilisés lors de la négociation suivante pour argumenter les décisions à prendre, comme justifier ou non l'impossibilité de réduire la marge de sécurisation d'une contrainte. Néanmoins, au cours du mois, en fonction des performances obtenues ou des écarts constatés, le bureau des méthodes et la coordination de production peuvent de nouveau se réunir pour renégocier les termes du contrat.

2.3.3. LES CARENCES DU PROCESSUS

Au cours de l'étude terrain, nous avons constaté quelques carences que nous soulignons dans cette partie.

2.3.3.1. SUIVI CONJONCTUREL DES DONNEES PREVISIONNELLES

Le suivi des données prévisionnelles n'est pas systématique et dépend, essentiellement, du litige opposant la coordination de production à la direction commerciale.

A Sevel Nord, site de production à côté de Valenciennes produisant en collaboration avec Fiat et Lancia des utilitaires et des monospaces, ce suivi a été mis en place jusqu'en Janvier 2004 en raison d'une qualité médiocre des données prévisionnelles de Fiat et de Lancia. Ce suivi a été abandonné après avoir obtenu la garantie d'une meilleure qualité. A Poissy, ce suivi est réalisé pour vérifier si la direction commerciale respecte les capacités maximales de production définies par l'usine terminale.

2.3.3.2. ABSENCE DE METHODES DANS LA DEFINITION DES CONTRAINTES

Dans les bonnes pratiques du groupe, nous avons constaté qu'il n'existait pas de méthodes pour définir les contraintes d'espacement. Il revient aux experts métiers, *i.e.* les équilibriers, de les identifier et de les définir. En interrogeant les équilibriers, nous avons constaté que leur approche s'appuyait beaucoup sur leur expérience.

Lors de la préparation, le choix du critère des contraintes d'espacement s'effectue en fonction des difficultés remontées de l'atelier, de l'expérience des équilibriers et de l'importance de la charge de travail des opérateurs (information subjective fondée sur le coefficient d'équilibrage). Souvent, comme nous le verrons ultérieurement, les contraintes d'espacement sont reportées d'un mois sur l'autre sans étude préalable.

Lors de la réunion de négociation, la validation des marges de sécurisation et des ratios de chaque contrainte d'espacement est effectuée à l'aide d'une évaluation grossière définie par expérience. Aucune méthode analytique ne nous a été présentée pour argumenter les décisions prises.

La conséquence de ces décisions se ressent lors de l'exécution. En effet, il n'est pas rare que les équilibriers doivent étudier une solution temporaire pour soulager le travail d'un ou plusieurs opérateurs. Cette solution peut prendre la forme d'une demande d'une nouvelle contrainte d'espacement à respecter par la coordination de production.

Enfin, le bureau des méthodes pourrait utiliser l'application SPELEO pour vérifier si leur choix est judicieux. Mais, ils ont constatés que les alertes déclenchées par ce système sont

trop nombreuses et trop mal appropriées pour s’y fier. Nous reviendrons ultérieurement sur ces aspects.

2.3.3.3. LA PRISE EN COMPTE DIVERSE DE LA DIFFICULTE A CREER LA LUO

Une des raisons évoquées par la coordination de production pour obtenir plus de flexibilité est la difficulté à respecter les contraintes d’espacement. Pour anticiper le mieux possible le respect de ces contraintes d’espacement individuellement ou simultanément, nous avons constaté une pléthore d’outils et de méthodes mathématiques. Chaque site de production dispose de ses outils spécifiques.

Poissy utilise une base de données pour évaluer les taux de croisement des contraintes d’espacement prises deux à deux. Sevel Nord simule un flux principal de production pour identifier les contraintes d’espacement difficiles à respecter. Sochaux applique simplement l’approche que nous venons de décrire sans tenir compte de ce phénomène. Quant à Rennes, ce site est celui qui a le plus traité ce phénomène. Il dispose de plusieurs méthodes mathématiques, mais aucune n’est réellement convaincante. Rappelons que le chapitre 4 est consacré à ce phénomène.

2.4. CONCLUSION

L’absence de corrélation entre le nombre de non respects et le nombre d’alertes, d’une part, et les carences identifiées dans le processus de définition des contraintes d’espacement, d’autre part, montre que les méthodes de création d’une liste de véhicules ordonnancés reposant sur la minimisation du nombre de non respects sont remises en cause. Par conséquent, nous avons exploré deux pistes :

- La définition des contraintes d’espacement et des ratios,
- La minimisation directement du nombre d’alertes.

Dans le chapitre 3, nous détaillerons la première piste et nous évoquerons rapidement la deuxième.

Dans le chapitre 4, nous avons décrit des méthodes pour anticiper la difficulté à respecter lors du séquençement des véhicules les contraintes d’espacement. Dans un premier temps, nous présentons une méthode utilisée dans la littérature pour évaluer chaque contrainte d’espacement individuellement. Dans un deuxième temps, nous proposons une modélisation de la difficulté à respecter deux contraintes d’espacement simultanément. Puis, dans un troisième temps, nous décrivons un outil permettant d’analyser toutes les contraintes d’espacement.

Enfin, pour aider les équilibreurs à évaluer la capacité de production de leur moyen de production, nous proposerons, dans le chapitre 5, des indicateurs permettant de catégoriser et de hiérarchiser l'ordre des postes de travail à adapter et une évolution du processus de négociation des contraintes pour intégrer la flexibilité dans leurs décisions.

Toutes ces informations contribuent à une meilleure évaluation de la flexibilité de la ligne d'assemblage. Et, par conséquent, elles doivent permettre d'assurer un meilleur dimensionnement des moyens de production.

3. Définition des contraintes d'espacement

Dans le deuxième chapitre, nous avons montré que le nombre de non respects des contraintes d'espacement, critère optimisé lors de la construction de la LUO, ne garantissait pas une minimisation du nombre d'alertes. Lors de cette analyse, nous avons identifié deux pistes de recherche : la définition des contraintes d'espacement et la minimisation directe des alertes. Nous allons aborder ces deux pistes dans ce chapitre, la première en détail et la deuxième brièvement.

Pour commencer, nous décrivons les différentes modélisations d'un opérateur en difficulté utilisées par PSA Peugeot Citroën et dans la littérature. Puis, inspiré par les travaux récents de Giard et Jeunet (2006), nous proposerons une modélisation adaptée au mode de fonctionnement observé in situ sur plusieurs postes de travail.

L'espacement des pics de charge sur les postes de travail est réalisé lors de la construction de la LUO par la définition d'une contrainte d'espacement. Cette contrainte est caractérisée par un critère, un ratio et un indicateur évaluant la qualité du respect de ce ratio. Le critère doit caractériser une population de véhicules qui pose un problème à la fabrication. Pour identifier clairement la relation qui existe entre les véhicules provoquant un pic de charge sur les postes de travail et les véhicules correspondant au critère, nous proposerons un outil représenté par une matrice colorée. Cette matrice permet aux équilibriers de choisir les critères qui couvriront le mieux leur moyen de production. Puis, pour un poste de travail et pour un ensemble de postes de travail, nous présenterons une méthode de calcul du ratio N/P. Ensuite, nous aborderons un indicateur évaluant le nombre de non respects de ce ratio dans une liste de véhicules. Pour résumer, nous allons identifier les postes nécessitant de la flexibilité en définissant les critères des contraintes d'espacement et nous allons estimer la flexibilité présente en calculant les ratios N/P.

Enfin, pour conclure ce chapitre, nous présenterons quelques résultats. Puis, nous préconiserons les caractéristiques d'un équilibrage pour permettre un séquençement efficace avec des contraintes d'espacement.

3.1. MODELISATION D'UN OPERATEUR EN DIFFICULTE

Pour anticiper les besoins de renforts sur un poste de travail, l'atelier montage est équipé d'un système d'alertes informant automatiquement les opérateurs polyvalents lorsqu'une difficulté sur un poste de travail est identifiée : SPELEO.

Pour mesurer la qualité de la séquence des véhicules dans l'atelier montage, nous avons comparé le nombre d'alertes et le nombre de non respects des contraintes montage. Les résultats de cette comparaison présentés dans le chapitre précédent ont mis en évidence une

absence de corrélation entre ces deux informations (section 2.3.3.2). Aussi, la première piste que nous explorons est la modélisation d'une alerte, *i.e.* l'identification des véhicules ne pouvant pas être terminés dans l'espace de travail de l'opérateur.

3.1.1. LES DONNEES

Les modélisations SPELEO-1 et SPELEO-2 présentées dans cette partie sont accompagnées d'une représentation graphique correspondant à la zone théorique occupée par l'opérateur pour traiter chaque véhicule (Figure 3.1).

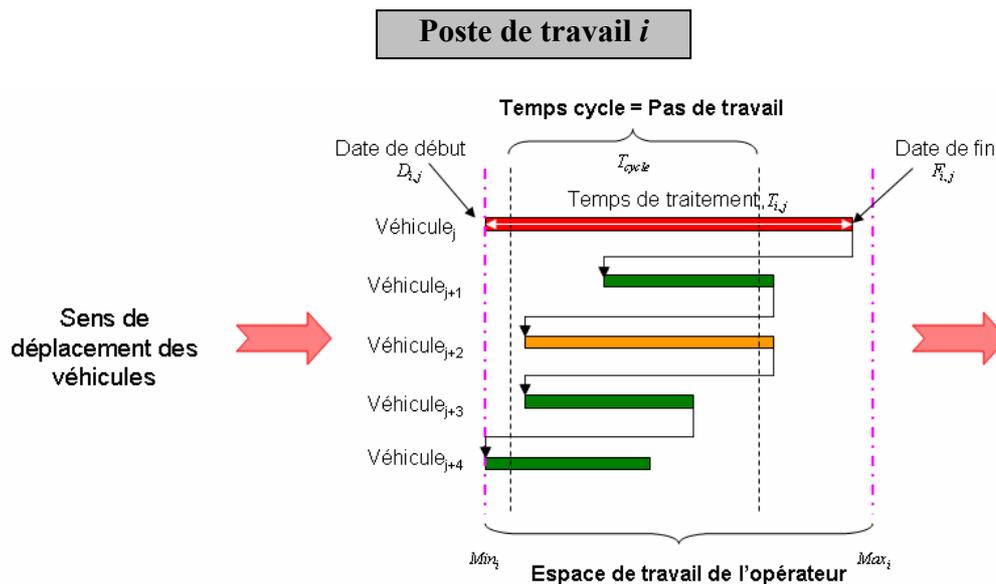


Figure 3.1 : Représentation graphique des modélisations d'un opérateur en difficulté

Tous les véhicules avancent à vitesse constante et traversent un pas de travail en un temps de cycle prédéfini, T_{cycle} . 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 . La date 0 de l'opérateur est le début du pas de travail auquel est rattaché le poste de travail de l'opérateur. Min_i sera toujours négative ou nulle et Max_i sera toujours égale ou supérieure au temps 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.

A partir des schémas chronologiques des postes et de la description détaillée de chacun de véhicules, nous évaluons le temps mis par un opérateur pour traiter un véhicule, $T_{i,j}$ (ce temps somme les temps de la gamme de fabrication et des opérations complémentaires). Puis, pour chaque véhicule, nous calculons la date de début, $D_{i,j}$, et la date de fin, $F_{i,j}$.

Un poste de travail compte Nb_op_i opérateurs. Un opérateur traite un véhicule complet. Même en cas d'intervention d'un opérateur polyvalent, il n'y a pas de partage de tâches pour des raisons qualité (risque d'oubli de tâches, gênes entre opérateurs, ...). Si $Nb_op_i > 1$, les opérateurs travaillent en quinconce de manière immuable (Cf. 1.2.2.). Par conséquent, chaque opérateur traite un véhicule tous les Nb_op_i véhicules, sur une distance de Nb_op_i pas de travail.

Pour faciliter la lecture des modèles et des exemples, nous considérerons qu'un poste de travail i compte un et un seul opérateur, *i.e.* $Nb_op_i = 1$. La prise en compte de plusieurs opérateurs peut être réalisée facilement en scindant la séquence de véhicules passant sur la ligne d'assemblage en autant de séquences que d'opérateurs.

Pour résumer, nous avons les informations suivantes :

- T_{cycle} , temps de cycle,
- Min_i , limite minimale du poste de travail i avec $Min_i \leq 0$
- Max_i , limite maximale du poste de travail i avec $Max_i \geq T_{cycle}$
- $T_{i,j}$, Temps d'exécution des tâches pour le véhicule j au poste de travail i .

A l'aide de ces informations, il est possible de classer chaque poste selon 4 catégories (Thomopoulos, 1967):

- Poste de travail fermé « Closed Station » : l'opérateur ne doit pas sortir de son pas de travail, *i.e.* $Min_i = 0$ et $Max_i = T_{cycle}$.
- Poste de travail fermé à gauche « Closed-to-the-left Station » : l'opérateur ne peut pas prendre de l'avance, *i.e.* $Min_i = 0$, mais peut dépasser la limite maximale de son pas de travail, *i.e.* $Max_i \geq T_{cycle}$.
- Poste de travail fermé à droite « Closed-to-the-right Station » : l'opérateur peut prendre de l'avance, *i.e.* $Min_i \leq 0$, mais ne doit pas dépasser la fin de son pas de travail, *i.e.* $Max_i = T_{cycle}$.
- Poste de travail ouvert « Open Station » : l'opérateur peut prendre de l'avance et dépasser la fin de son pas de travail, *i.e.* $Min_i \leq 0$ et $Max_i \geq T_{cycle}$.

Notons que d'un point de vue théorique, le poste de travail ouvert inclut les 3 autres en fixant $Min_i = 0$ et/ou $Max_i = T_{cycle}$.

Le projet APOLO¹¹ préconise deux types de postes, les postes de travail fermés et les postes de travail fermés à gauche. Mais, en pratique, nous avons observé des postes de travail fermés (cas des postes n'ayant pas de pics de charge) et aussi des postes de travail ouverts (cas des postes ayant des pics de charge).

3.1.2. LES HYPOTHESES

Tous les modèles que nous allons présenter sont soumis aux hypothèses suivantes :

- Les informations présentes dans les systèmes d'information (temps de traitement, limite de l'espace de travail, nombre d'opérateurs, ...) sont correctes et déterministes,
- L'opérateur respecte les schémas chronologiques de poste,
- L'opérateur ne rencontre pas d'aléas mécaniques (panne d'une visseuse), d'approvisionnement (manque de pièces) ou physiques (fatigue, maladie, ...),
- Les opérateurs polyvalents sont informés suffisamment tôt d'une alerte pour pouvoir se rendre facilement au poste de travail et traiter le véhicule pour lequel l'opérateur est en difficulté,
- Les opérateurs polyvalents sont assez nombreux pour pouvoir traiter toutes les alertes susceptibles de se produire simultanément sur la ligne d'assemblage.

3.1.3. LA MODELISATION SPELEO-1

Cette première modélisation représente la modélisation appliquée dans SPELEO depuis 2002 (Figure 3.2). Elle repose sur une hypothèse élémentaire dépendante de la gestion des postes de travail préconisée par le projet APOLO. Si un véhicule provoque un pic de charge sur un poste de travail, l'équilibrage doit permettre à l'opérateur de récupérer le retard sur 2 véhicules maximum (un avant et un après).

Par conséquent, une alerte est déclenchée lorsqu'un opérateur ne peut pas récupérer le retard pris par un véhicule avec un pic de charge sur le véhicule précédent et le véhicule suivant. Cela suppose que l'opérateur, sur une succession de 3 véhicules, travaille en moyenne plus de T_{cycle} . Néanmoins, si le dépassement du véhicule déclenchant une alerte est inférieur à un seuil, appelé filtre f_i (correspondant à un pourcentage du T_{cycle}), l'alerte est annulée car le faible dépassement ne justifie pas le déplacement d'un opérateur polyvalent.

¹¹ Cf. 1.2.4.2.5

Calcul des dépassements initiaux de tous les véhicules d'une séquence de véhicules donnés

Pour chaque véhicule j de la séquence engagée au montage

$$E_{i,j} = T_{i,j} - T_{cycle} ; D_{i,j} = 0$$

Fin pour

Calcul des dates de début et de fin de chaque véhicule

Pour chaque véhicule j de la séquence engagée au montage

Si $E_{i,j} > 0$ et $E_{i,j-1} < 0$

Alors on reporte tout ou partie du dépassement sur le véhicule précédent

$$\Delta = \min(-E_{i,j-1}, E_{i,j}) ; D_{i,j} = D_{i,j} - \Delta ; E_{i,j-1} = E_{i,j-1} + \Delta ; E_{i,j} = E_{i,j} - \Delta$$

Fin si

Si $E_{i,j} > 0$ et $E_{i,j+1} < 0$

Alors on reporte tout ou partie du reste du dépassement sur le véhicule suivant

$$\Delta = \min(-E_{i,j+1}, E_{i,j}) ; E_{i,j+1} = E_{i,j+1} + \Delta ; E_{i,j} = E_{i,j} - \Delta$$

Fin si

$$F_{i,j} = D_{i,j} + T_{i,j}$$

$$S_{i,j} = \begin{cases} 1 \text{ si } E_{i,j} < -5\% * T_{cycle} \\ 2 \text{ si } E_{i,j} \leq f_i * T_{cycle} \\ 3 \text{ si } E_{i,j} > f_i * T_{cycle} \end{cases}$$

Fin pour

Figure 3.2 : Modélisation SPELEO-1

Cet algorithme permet ainsi de déterminer pour chaque véhicule :

- $D_{i,j}$, Date de début de traitement du véhicule j au poste de travail i ,
- $F_{i,j}$, Date de fin de traitement du véhicule j au poste de travail i .
- $S_{i,j}$, Etat du véhicule j au poste de travail i :

Si $S_{i,j} = 3$, le véhicule déclenche une alerte (véhicule en rouge)

Si $S_{i,j} = 2$, les prochains véhicules risquent de provoquer une alerte (véhicule en vert),

Si $S_{i,j} = 1$, l'opérateur n'a pas de difficulté apparente (véhicule en bleu).

- $E_{i,j}$, Temps de dépassement du véhicule j au poste de travail i .

La figure 3.3 illustre le calcul du dépassement et un exemple d'application de la modélisation SPELEO-1 sur une séquence de 4 véhicules (V_1 , V_2 , V_3 et V_4) avec un temps cycle d'une minute. La couleur des cases correspond à l'état du véhicule ($S_{i,j}$). Le véhicule V_3 provoque un dépassement de 0'09 qui peut être partiellement reporté sur V_2 (0'01) et V_4 (0'05). Mais, bien sûr, il reste un dépassement de 0'03. Ce qui explique le déclenchement d'une alerte.

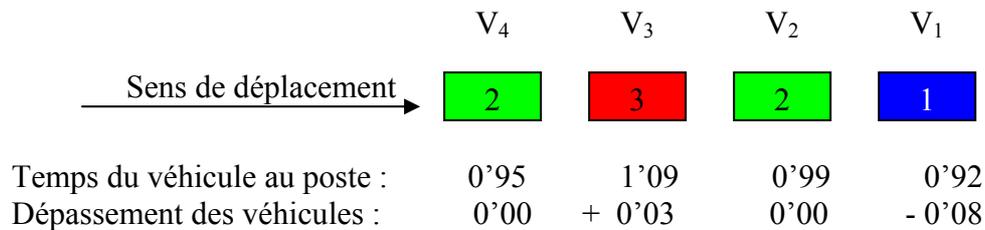


Figure 3.3 : Exemple de calcul avec la modélisation SPELEO-1

Les figures 3.4 et 3.5 illustrent l'application de la modélisation SPELEO-1 avec deux seuils différents. Les données utilisées correspondent à un extrait de 16 véhicules de la journée de production du 22/04/2005 sur la ligne L2 de Poissy produits sur le poste de travail réalisant le serrage des tuyaux des freins. Le tableau de gauche de chacune des figures contient la durée ($T_{i,j}$), la date de début ($D_{i,j}$), la date de fin du traitement ($F_{i,j}$), le temps de dépassement en minutes ($E_{i,j}$) et le niveau de difficulté de l'opérateur pour chaque véhicule ($S_{i,j}$). Dans notre cas, nous avons un temps cycle de 1,24 minutes (T_{cycle}) et un filtre de 0% pour la figure 3.4 ($f_i = 0\%$) et 5% pour la figure 3.5 ($f_i = 5\%$).

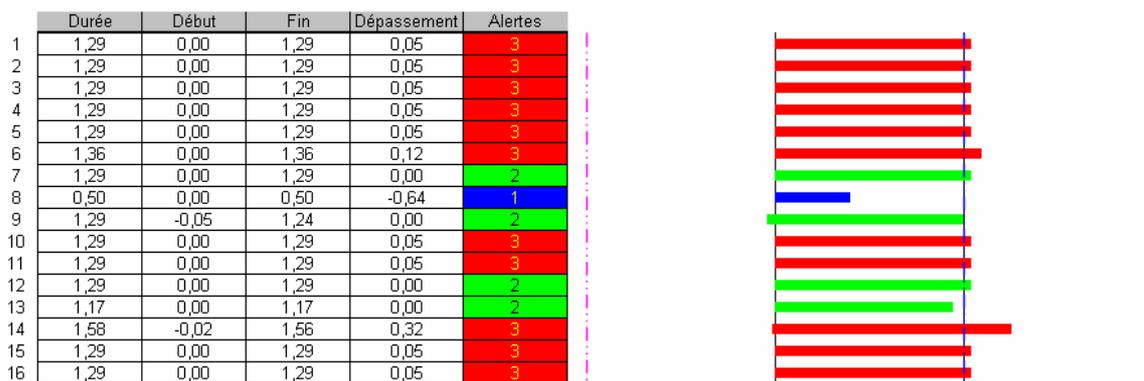


Figure 3.4 : SPELEO-1 : 6M1A6247 « Serrage Tuyau Frein » à Poissy (22/04/2005), filtre=0%

Sur la figure 3.4, cas avec un seuil à 0%, dès le premier véhicule, l'algorithme déclenche une alerte. Sur la figure 3.5, cas avec un seuil fixé à 5%, les alertes sur le 6^{ème} et le 14^{ème} véhicule sont dues aux grands pics de charge de ces derniers.



Figure 3.5 : SPELEO-1 : 6M1A6247 « Serrage Tuyau Frein » à Poissy (22/04/2005), filtre = 5%

Le poste de travail « Serrage Tuyau Frein » figure parmi les postes de travail observés à Poissy (section 2.3.3.1.3). Les figures 3.4 et 3.5 sont caractéristiques des situations incohérentes à l'origine du débranchement de l'application SPELEO. Sur la figure 3.4, quasiment tous les véhicules provoquant un pic de charge déclenchent une alerte. Les opérateurs polyvalents sont très souvent contactés alors que l'opérateur n'est pas si souvent en difficulté. Nous avons en fait observé que l'opérateur était en difficulté sur le 4^{ème} véhicule et le 14^{ème} véhicule. Donc, sur les 11 alertes déclenchées, 9 alertes ne nécessitent pas l'intervention d'un opérateur polyvalent.

Comme les dépassements constatés pour chacun des véhicules provoquant une alerte sont très faibles (moins de 0,05 minutes, soit moins de 3 secondes), les équilibreurs définissent un filtre pour informer les opérateurs polyvalents des alertes les plus importantes. Pour ce poste de travail, un filtre de 5% a été défini. Une alerte sera importante et déclenchée si le dépassement excède 4 secondes. Nous avons illustré le résultat sur la figure 3.5.

Sur la figure 3.5, nous avons représenté sur la droite les véhicules pour lesquels un opérateur polyvalent est intervenu. Sur les 2 alertes déclenchées, une alerte n'a pas été déclenchée sur le bon véhicule et une alerte n'a pas été déclenchée pour la bonne raison. L'intervention de l'opérateur polyvalent sur le 6^{ème} véhicule intervient deux véhicules trop tard. L'alerte du 14^{ème} véhicule qui semble être justifiée, est déclenché par le grand pic de charge de ce véhicule. Dans les deux cas, ce n'est pas l'accumulation de pics de charge qui est responsable de l'intervention d'un opérateur polyvalent mais la présence d'un véhicule ayant un dépassement plus important que les autres véhicules (0'12 pour le premier et 0'32 pour le deuxième contre au plus 0'05 pour tous les autres).

Comme la modélisation SPELEO-1 ne rend pas bien compte des observations faites sur le terrain, nous avons recherché une modélisation plus adaptée : SPELEO-2. Mais, auparavant, nous présentons les principales approches rencontrées dans la littérature.

3.1.4. LES APPROCHES DE LA LITTÉRATURE

Les approches que nous présentons dans cette partie reposent sur une modélisation de la charge de travail d'un opérateur basée sur la représentation décrite dans la section 1.3.1.1. Les différences résident dans l'utilisation et la prise en compte des installations et des modes de fonctionnement.

Pour toutes les approches, un opérateur suit la progression d'un véhicule durant le temps nécessaire pour réaliser ses tâches. Puis, quand il a terminé, il passe au véhicule suivant, en sachant qu'il ne peut pas remonter de plus d'un pas de travail entre deux véhicules et qu'il n'est pas autorisé à remonter au-delà du début de son pas de travail, *i.e.* $Min_i = 0$ (seuls les postes de travail fermés à gauche sont considérés).

Pour Giraud-David (1992), sa modélisation sert à qualifier globalement la qualité d'une séquence de véhicules en médiocre-mauvaise, médiocre, mauvaise, bonne ou très bonne. L'algorithme d'optimisation qui est proposé a pour but de maximiser la qualité de la séquence de véhicules engagée sur la ligne d'assemblage. L'inconvénient de cette modélisation est l'absence de prise en compte de l'arrêt des installations ou de l'intervention d'intérimaires ou d'opérateurs polyvalents. Les pics de charge peuvent se cumuler sans fin, *i.e.* $Max_i = \infty$.

Tsaï (1992) et Kim (2001) introduisent dans leur modélisation l'arrêt du convoyeur. Un opérateur ne peut pas sortir de son espace de travail. Aussi, dès que l'opérateur atteint la limite maximale de son espace, l'opérateur tire un signal d'alarme et le véhicule s'arrête pour permettre à ce dernier de terminer sa tâche. Cette méthode s'apparente à la méthode ANDON¹² de Toyota. Leur modélisation sert ensuite à proposer un programme linéaire construisant une séquence de véhicules minimisant la durée d'arrêt de la ligne d'assemblage, soit la somme des temps de dépassement.

Giard et Jeunet (2006), quant à eux, présentent deux modélisations dépendantes du mode d'intervention d'un intérimaire :

- Soit il complète le travail de l'opérateur lorsque le véhicule franchit la limite maximale de son espace de travail. La modélisation est similaire à celle de Kim. La seule différence réside dans le fait que l'opérateur n'arrête pas la ligne de montage mais il est remplacé au pied levé (GIARD-1).

¹² ANDON : petite lanterne (en Japonais). Le signal d'alarme allume une lumière qui permet aux autres opérateurs sur la ligne de production d'anticiper un éventuel problème.

- Soit il traite complètement le véhicule qui ne sera pas terminé dans l'espace de travail de l'opérateur (GIARD-2).

Pour ces deux approches, Giard et Jeunet proposent un programme linéaire pour construire une séquence qui minimise un coût global. Une des composantes de ce coût est le nombre d'intérimaires nécessaire sur la ligne d'assemblage pour absorber toutes les opérations liées aux opérateurs en difficulté.

La deuxième approche de Giard et Jeunet est exactement celle considérée par le groupe PSA Peugeot Citroën. Par conséquent, nous allons remplacer l'intervention d'un intérimaire par l'intervention d'un opérateur polyvalent et nous allons l'adapter aux postes de travail ouverts.

3.1.5. LA MODELISATION SPELEO-2

La modélisation SPELEO-1 qui est actuellement utilisée ne permet pas d'identifier efficacement le moment où un opérateur est en difficulté. La modélisation SPELEO-2 qui dérive de l'approche de Giard est une proposition que nous avons faite pour faire évoluer cette application.

Si on constate qu'un véhicule doit sortir de l'espace de travail, un opérateur polyvalent, informé par l'application SPELEO, intervient et traite ce véhicule lorsqu'il arrive au poste de travail (4^{ème} véhicule de la figure 3.6). Cela permet à l'opérateur affecté au poste de travail de récupérer le retard accumulé en passant du 3^{ème} au 5^{ème} véhicule directement. Nous supposons, dans ce cas, que l'opérateur polyvalent ne gêne pas et n'est pas gêné pour réaliser ses tâches.

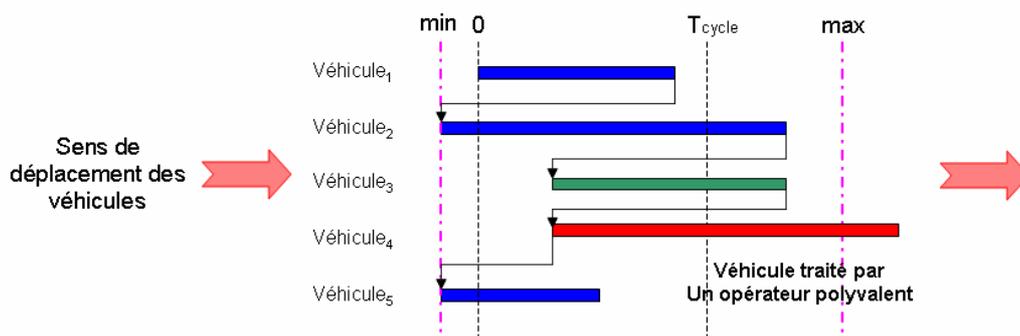


Figure 3.6 : Prise en compte de l'intervention d'un opérateur polyvalent

Pour un poste de travail i , l'intervention d'un opérateur polyvalent, illustré par la figure 3.6, est modélisée par la figure 3.7. La date de début du véhicule j , $D_{i,j}$, dépend de la situation de l'opérateur suivant qu'il soit au début de la journée, après un véhicule qu'il a traité ou après un véhicule traité par un opérateur polyvalent. Au premier véhicule de la

journée, $j = 1$, l'opérateur commence au début de son pas de travail, $D_{i,j} = 0$ (1^{er} véhicule de la figure 3.6). Si l'opérateur a traité le véhicule précédent sans solliciter l'aide d'un opérateur polyvalent, $F_{i,j-1} \leq Max_i$, il peut remonter la ligne d'un pas de travail mais pas au-delà de la limite minimale, $D_{i,j} = Max(Min_i, F_{i,j-1} - T_{cycle})$ (2^{ème} véhicule de la figure 3.6). Par contre, si l'opérateur n'a pas traité le véhicule précédent ($j - 1$) car il n'aurait pas pu le terminer dans son espace de travail, $F_{i,j-1} > Max_i$ (4^{ème} véhicule de la figure 3.6), alors l'opérateur, qui se situe à $D_{i,j-1}$, peut encore remonter d'un pas de travail, $Max(Min_i, D_{i,j-1} - T_{cycle})$ (5^{ème} véhicule de la figure 3.6).

Pour chaque véhicule j de la séquence engagée au montage

$$D_{i,j} = \begin{cases} 0 & \text{Si } j = 1 \\ Max(Min_i, F_{i,j-1} - T_{cycle}) & \text{Si } F_{i,j-1} \leq Max_i \text{ et } j > 1 \\ Max(Min_i, D_{i,j-1} - T_{cycle}) & \text{Sinon} \end{cases}$$

$$F_{i,j} = D_{i,j} + T_{i,j}$$

$$E_{i,j} = D_{i,j} + T_{i,j} - Max_i$$

$$S_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{si } D_{i,j} \leq 0 \text{ et } F_{i,j} \leq Max_i \\ 2 & \text{si } D_{i,j} > 0 \text{ et } F_{i,j} \leq Max_i \\ 3 & \text{si } F_{i,j} > Max_i \end{cases}$$

Fin pour

Figure 3.7 : Modélisation SPELEO-2

La figure 3.8 illustre l'application de la modélisation SPELEO-2 avec le même jeu de données que celui utilisé pour illustrer la modélisation SPELEO-1. La limite minimale a été fixée à $Min_i = -0,16$, et la limite maximale à $Max_i = 1,60$ minutes. Ces limites correspondent aux limites réelles du poste de travail.

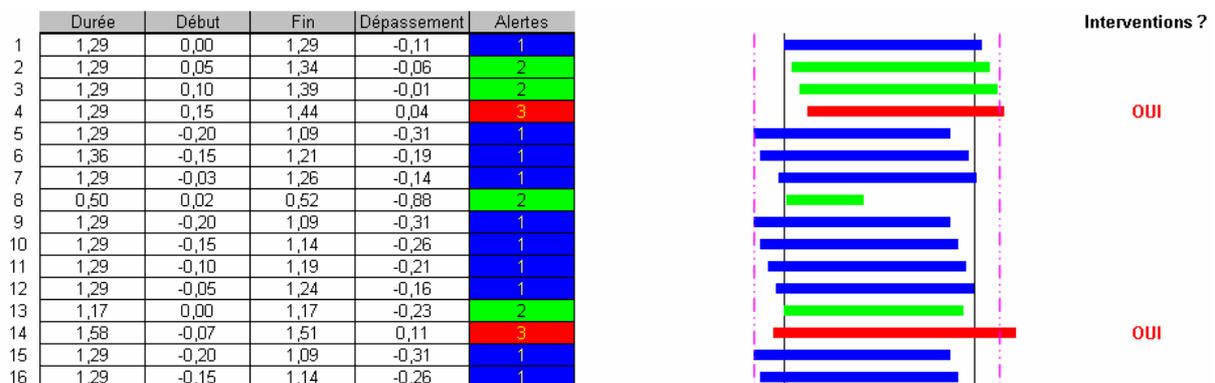


Figure 3.8 : SPELEO-2 : 6M1A6247 « Serrage Tuyau Frein » à Poissy (22/04/2005)

Comme nous pouvons le constater, les alertes sont déclenchées sur les véhicules dont le cumul des pics de charge fait sortir l'opérateur de son espace de travail (4^{ème} et 14^{ème} véhicule de la liste), ce qui est bien sûr l'objectif recherché. De plus, ils correspondent, selon les observations faites sur ce poste de travail, aux véhicules pour lesquels l'opérateur a réellement été en difficulté. Ces éléments nous permettent de valider la modélisation proposée.

3.1.6. *SYNTHESE*

Le tableau 3.1 synthétise les fonctions couvertes par les différentes approches abordées dans cette partie. Le type de poste de travail correspond à la catégorisation faite par Thomopoulos. Le cumul des retards représente les modélisations prenant en compte le déplacement d'un opérateur sur un poste de travail. Le travail incomplet désigne le fait qu'un opérateur polyvalent ou un intérimaire remplace au pied levé l'opérateur qui sort de son espace de travail. La substitution de l'opérateur intervient lorsqu'un opérateur polyvalent ou un intérimaire intervient pour traiter complètement le véhicule qui oblige l'opérateur à sortir de son espace de travail. Et, enfin, l'arrêt du convoyeur signifie que l'opérateur arrête la ligne d'assemblage dès qu'il sort de son espace de travail. GIARD (1) et GIARD (2) correspondent aux deux modélisations abordées par Giard et Jeunet (2006).

	SPELEO 1	GIRAUD-DAVID	KIM GIARD (1)	GIARD (2)	SPELEO 2
Type de poste	Open	Closed-to-left	Closed-to-left	Closed-to-left	Open
Cumul des retards		X	X	X	X
travail incomplet			X		Non appliqué
substitution de l'opérateur				X	X
Arrêt du convoyeur			X		Non appliqué

Tableau 3.1 : Tableau de synthèse de la modélisation d'un opérateur en difficulté

3.1.7. *RESULTATS NUMERIQUES*

Avec le concours des équilibreur, nous avons comparé le nombre d'alertes déclenchées sur une même journée de production à Sevel Nord (23/05/2006) par les modélisations SPELEO-1 (la situation actuelle) et SPELEO-2 (notre proposition). La ligne de production de Sevel Nord a produit 719 véhicules cette journée-là. Elle compte 212 postes de travail dont 194 ont au moins un véhicule provoquant un pic de charge. Pour chacun de ces

postes de travail, l'équilibreur nous a transmis les limites minimales et maximales. Nous avons regroupé les résultats dans le tableau 3.2.

	SPELEO 1	SPELEO 2	Nombre de dépassements		
			Commun	Inutile	Non identifié
Nombre d'alertes	5833	1217	653	5180	564
Nombre de postes	111	51	37	74	14

Tableau 3.2 : Comparaison des modélisations SPELEO-1 et SPELEO-2 (23/05/2006)

La modélisation SPELEO-1, avec tous les filtres réglés à $f_i = 0$, a déclenché 5833 alertes sur 111 postes de travail contre seulement 1217 alertes sur 51 postes de travail avec la modélisation SPELEO-2. Parmi les alertes déclenchées par la modélisation SPELEO-1, 653 alertes ont été identifiées comme telles par la modélisation SPELEO-2, soit environ 11% des alertes actuelles. Cela signifie que $1217 - 653 = 564$ alertes n'ont pas été identifiées par SPELEO-1 et qu'inversement nous avons eu 5180 alertes qui n'en étaient pas. Sur les 111 postes ayant une alerte avec la modélisation SPELEO-1, 74 postes de travail ne provoquent théoriquement pas d'alertes. Et, 14 postes de travail qui n'avaient pas d'alertes avec la modélisation SPELEO-1 ont par contre eu des alertes avec la modélisation SPELEO-2.

Dans la section 2.3.3, nous avons observé que l'application SPELEO était très souvent débranchée car les renseignements qu'elle fournissait ne coïncidaient pas avec les difficultés réelles des opérateurs. La comparaison des deux modélisations et les résultats numériques confirment cette impression.

3.1.8. CONCLUSION

Comme nous l'avons indiqué précédemment (Cf 3.1.5), la modélisation SPELEO-2 représente beaucoup mieux un opérateur en difficulté que la modélisation SPELEO-1. Le problème de séquençement des véhicules peut alors être enrichi d'un nouvel objectif : minimiser le nombre d'opérateurs en difficulté. Par conséquent, le problème revient à déterminer une séquence de véhicules minimisant le nombre d'alertes correspondant à la modélisation SPELEO-2.

Pour cela, nous avons envisagé deux approches :

- Proposer un nouvel algorithme de séquençement des véhicules minimisant directement le nombre d'alertes,
- Conserver l'algorithme de séquençement des véhicules minimisant le nombre de non respects des contraintes d'espacement, en espérant que cela conduise effectivement à réduire le nombre d'alertes.

La première approche est très intéressante car elle conduit à repenser complètement le classique problème du « Car Sequencing Problem ». Un premier travail a été abordé par El Hadj Khalaf (2006) qui a proposé une méta-heuristique à base de recuit simulé. Le tableau 3.3 compare le nombre d’alertes de l’outil de séquençement proposé au nombre d’alertes de la liste engagée dans l’atelier montage le 23/05/2006. Pour cet exemple, l’algorithme proposé réduit de 45% le nombre d’alertes et le nombre de postes ayant au moins une alerte.

	Entrée montage	El Hadj Khalaf
Nombre d’alertes	1217	662
Nombre de postes	51	28

Tableau 3.3 : Amélioration apportée par l’algorithme de El Hadj Khalaf

Mais, pour le moment, cette approche prometteuse n’est pas envisageable d’un point de vue industriel pour le groupe PSA Peugeot Citroën car le coût nécessaire pour modifier son système d’information est jugé trop élevé par rapport aux gains potentiels. Il sera néanmoins intéressant de poursuivre les recherches dans ce sens notamment lorsque le nombre de postes avec pics de charges aura diminué (APOLO) rendant la complexité du problème plus abordable..

Dans la suite de ce chapitre, nous développerons la deuxième approche qui ne nécessite pas de modifications importantes du système d’information. Elle consiste à proposer une méthode qui permette aux équilibriers de définir efficacement les contraintes d’espacement, telle que la minimisation du nombre de non respects conduise effectivement à réduire le nombre d’alertes. Nous pouvons rappeler que, dans les bonnes pratiques du groupe PSA Peugeot Citroën, il n’existe pas de méthodes pour définir les critères des contraintes d’espacement (Cf. 2.3.3.2).

3.2. DEFINITION DU CRITERE D’UNE CONTRAINTE D’ESPACEMENT

Dans les modélisations que nous venons de présenter, seul un véhicule provoquant un pic de charge déclenche une alerte. En effet, soit le pic de charge n’a pas été réparti sur le véhicule précédent et suivant (SPELEO-1), soit le pic de charge accroît encore le retard d’un opérateur jusqu’à lui faire franchir la limite maximale (Giraud-David, Kim, Giard et Jeunet, SPELEO-2). Par conséquent, une contrainte d’espacement doit espacer les véhicules provoquant un pic de charge. Le respect de cette contrainte devra minimiser le nombre d’appels d’opérateurs polyvalents (ou d’arrêts ANDON).

L'utilisation d'une contrainte d'espacement dans le cas du problème de séquençement des véhicules nécessite la définition d'un critère pour caractériser un ensemble de véhicules provoquant un pic de charge. Ce critère prend la forme d'une option ou d'une combinaison d'options comme « toit ouvrant », « sièges électriques » ou « jantes aluminium et toit ouvrant ».

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 représentée par une matrice colorée. Cette matrice permettra aux équilibreur de définir un jeu de critères à appliquer lors du séquençement des véhicules après un équilibrage ou un rééquilibrage.

3.2.1. CARACTERISATION DE LA RELATION ENTRE UN POSTE DE TRAVAIL ET UNE CONTRAINTE D'ESPACEMENT

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.

3.2.1.1. ETAT DE L'ART

Parello et al (1986), Yano et Rachamadugu (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.

Quant à Giard et Jeunet (2006), ils simplifient le problème de séquençement des véhicules en considérant une contrainte d'espacement comme une option ou une combinaison d'options provoquant un pic de charge sur un poste de travail. Cette simplification leur permet de réduire le nombre de contraintes du programme linéaire modélisant le problème général d'ordonnement des véhicules sur une ligne de production et d'assemblage.

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 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 Yano (1989) proposent un indicateur de criticité qui lui permet de classer les postes de travail par ordre d'importance. Ensuite, il n'a plus qu'à sélectionner les postes de travail qu'il estime les plus critiques.

Dans ce mémoire, nous avons écarté temporairement cette approche car nous avons constaté qu'un même critère pouvait répondre aux besoins de plusieurs postes de travail simultanément comme nous allons le décrire ci-dessous. 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.

3.2.1.2. LES RELATIONS

Considérons :

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 le 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 3.4, 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 3.4 : Evaluation de la relation d'un poste de travail et d'une contrainte d'espace

Nous pouvons représenter chacune des relations avec les figures de 3.9 à 3.13. Le graphique en barre représente la charge de travail d'un opérateur sur un poste à deux temps de traitement : les véhicules ne provoquant pas de pic de charge (en vert) et les véhicules provoquant un pic de charge (en rouge). 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 caractérisés par une contrainte d'espace sur le poste de travail. Pour l'exemple, nous avons considéré la même contrainte d'espace et cinq postes de travail différents.

1. Si $V_{c_k} = V_{p_i}$, tous les véhicules provoquant un pic de charge sur le poste de travail i et uniquement ceux-là sont caractérisés par la contrainte d'espace k . Dans ce cas, nous dirons que « le poste de travail i est contraint par la contrainte d'espace k » (figure 3.9).



Figure 3.9 : Poste contraint par une contrainte

2. Si $V_{c_k} \cap V_{p_i} = V_{p_i}$ 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'espace k mais une partie des véhicules caractérisée par cette même contrainte d'espace k ne provoque pas un pic de charge sur le poste de travail i . En d'autres termes, la contrainte d'espace 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'espace k » (Figure 3.10).

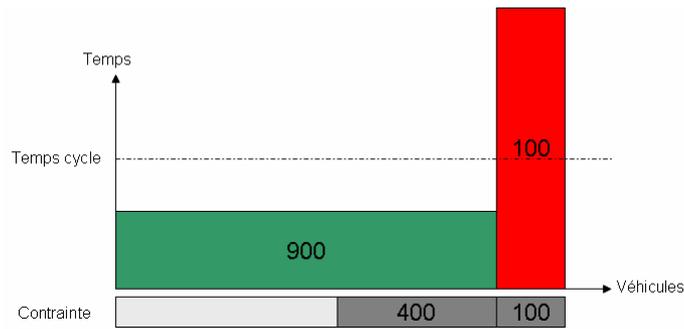


Figure 3.10 : Poste sur contraint par une contrainte

3. Si $V_{p_i} \cap V_{c_k} = V_{c_k}$ 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 3.11).



Figure 3.11 : Poste sous contraint par une contrainte

4. Si $V_{c_k} \cap V_{p_i} \neq \emptyset$, $V_{p_i} \cap V_{c_k} \neq V_{c_k}$ 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'espacement k évalue une partie du besoin. Dans ce cas, nous dirons que « le poste de travail i est impacté par la contrainte d'espacement k » (Figure 3.12).

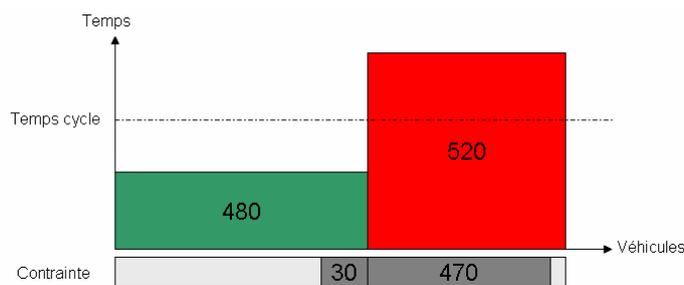


Figure 3.12 : Poste impacté par une contrainte

5. Si $V_{c_k} \cap V_{p_i} = \emptyset$, 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 3.13). Ceci n'est pas totalement vrai mais l'impact sera indirect et entrera dans le cadre des interactions de contraintes que nous développerons ultérieurement.

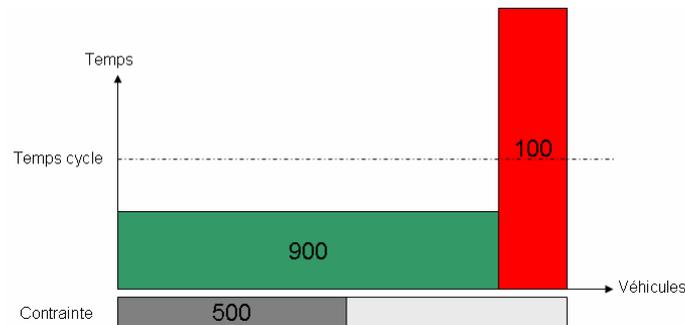


Figure 3.13 : Poste non impacté par une contrainte

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

3.2.2. **HIERARCHISATION 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 3.14 le montrent.

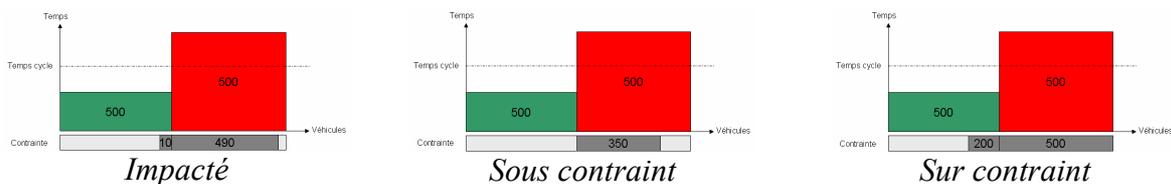


Figure 3.14 : Exemple de nuances possibles dans les relations

Sur la figure 3.14, pour un même poste de travail, nous avons pris en compte 3 critères différents pour représenter une contrainte d'espace. Si nous devons choisir un des trois critères, lequel devons-nous prendre en compte ?

Pour mesurer le degré de pertinence entre un poste de travail i et le critère d'une contrainte d'espace k , nous proposons l'indicateur de pertinence, $I_{p_i,k}$ (équation 3.1).

$$I_{p_i,k} = \frac{\text{Card}(Vc_k \cap Vp_i)}{\text{Card}(Vp_i)} * \frac{\text{Card}(\overline{Vc_k} \cap \overline{Vp_i})}{\text{Card}(\overline{Vp_i})} \quad (3.1)$$

$$\text{Avec } \overline{Vc_k} = V - Vc_k \text{ et } \overline{Vp_i} = V - Vp_i$$

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, *i.e.*

$$\frac{\text{Card}(Vc_k \cap Vp_i)}{\text{Card}(Vp_i)}.$$

- 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, *i.e.*

$$\frac{\text{Card}(\overline{Vc_k} \cap \overline{Vp_i})}{\text{Card}(\overline{Vp_i})}.$$

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

Dans le cas de la figure 3.14, le calcul de cet indicateur pour les trois critères nous donne les résultats suivants :

$$\text{« Impacté »} \quad \rightarrow I_{p_i,k} = \frac{\text{Card}(Vc_k \cap Vp_i)}{\text{Card}(Vp_i)} * \frac{\text{Card}(\overline{Vc_k} \cap \overline{Vp_i})}{\text{Card}(\overline{Vp_i})} = \frac{490}{500} * \frac{490}{500} = 0,96$$

$$\text{« Sous contraint »} \quad \rightarrow I_{p_i,k} = \frac{\text{Card}(Vc_k \cap Vp_i)}{\text{Card}(Vp_i)} * \frac{\text{Card}(\overline{Vc_k} \cap \overline{Vp_i})}{\text{Card}(\overline{Vp_i})} = \frac{350}{500} * \frac{500}{500} = 0,70$$

$$\text{« Sur contraint »} \quad \rightarrow I_{p_i,k} = \frac{\text{Card}(Vc_k \cap Vp_i)}{\text{Card}(Vp_i)} * \frac{\text{Card}(\overline{Vc_k} \cap \overline{Vp_i})}{\text{Card}(\overline{Vp_i})} = \frac{500}{500} * \frac{300}{500} = 0,60$$

L'utilisation de cet indicateur de pertinence pour l'exemple de la figure 3.14 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 en modifier les données de la figure 3.14 pour trouver tous les ordres possibles.

3.2.3. CARACTERISATION D'UN POSTE DE TRAVAIL

Nous proposons d'agrèger 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 3.2). En effet, la relation la plus pertinente conditionnera l'espacement des pics de charge sur le poste de travail.

$$I'_{p_i} = \max_{k \in C} (I_{p_i,k}) \quad (3.2)$$

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 équilibriers 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, et plus les risques d'alertes non détectées par un non respect de contraintes sera important.

3.2.4. MATRICE COLOREE DES RELATIONS

Pour aider l'équilibreur à choisir les critères de contrainte d'espacement les plus adaptés à ses moyens de production, 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 3.15).

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 3.5. La couleur des cases représente la valeur de l'indicateur de pertinence. Plus la case est bleue 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 équilibriers à choisir les contraintes d'espacement les plus pertinentes, *i.e.* telles 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	SUR	IMP	IMP	IMP	IMP	SUR			IMP			
5LH3132G	SOUS	IMP	SOUS	IMP	IMP	IMP	IMP	IMP	IMP	IMP	IMP	IMP
5LH3135D	CNT	IMP	IMP	IMP	CNT	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	CNT	IMP	CNT	IMP	IMP	IMP		IMP	IMP			
5LH3242D	IMP	IMP	SOUS	IMP	SOUS	SOUS		IMP	IMP			
5LH3343G	IMP	IMP					IMP		IMP	IMP	IMP	IMP

Figure 3.15 : Exemple de matrice colorée des relations

La figure 3.15 représente un extrait de la matrice colorée des relations du site de Sevel Nord en Mai 2006. Les postes de travail de la ligne d'assemblage sont représentés en ligne. Et, les 11 contraintes d'espacement négociées sont représentées en colonne. La colonne « Rel. » correspond à la caractérisation d'un poste de travail. Cette matrice montre que certains postes de travail sont insuffisamment représentés lors du séquençage comme le poste de travail 5LH3137G.

<i>Relation</i>	<i>Libellé</i>
Poste contraint par une contrainte	« CNT »
Poste sur contraint par une contrainte	« SUR »
Poste sous contraint par une contrainte	« SOUS »
Poste impacté par une contrainte	« IMP »
Poste non impacté par une contrainte	« »

Tableau 3.5 : Correspondance entre la nature de la relation et le libellé de la matrice

3.2.5. CAS D'APPLICATION : SEVEL NORD – MAI 2006

Nous avons utilisé la matrice colorée des relations à Sevel Nord en Mai 2006 pour étudier la validité des contraintes d'espacement négociées par rapport aux postes de travail présentant des pics de charges.

Au mois de Mai 2006, 11 contraintes d'espacement étaient exprimés. Sur la figure 3.16, nous avons représenté graphiquement les indicateurs de pertinence des postes de travail pour cet ensemble de contraintes d'espacement. Les postes de travail ayant un pic de charge ont été triés par ordre décroissant d'indicateur de pertinence. L'analyse de ces résultats montre que seulement 6% des postes de travail ont un indicateur de pertinence égal à 1.

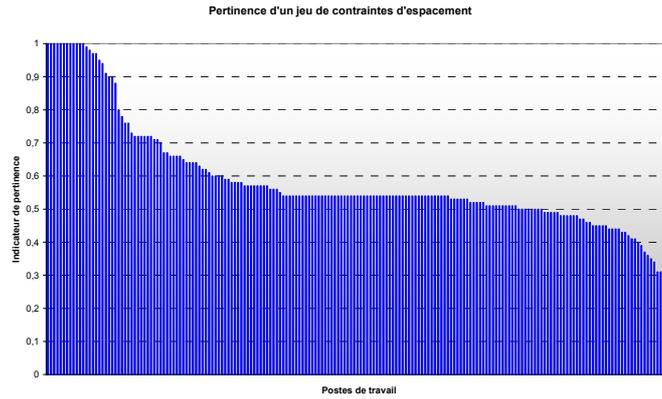


Figure 3.16 : Pertinence des contraintes d'espacement négociées (Sevel Nord – Mai 2006)

Sur ce site, les critères « monospace » et « utilitaires » sont lissés le plus possible au cours de la journée. Ces critères représentent les deux modèles de véhicules produits sur ce site. Ils ne sont pas négociés comme des contraintes d'espacement. La figure 3.17 représente graphiquement les indicateurs de pertinence des postes de travail pour ces deux critères. Le nombre de postes de travail ayant un indicateur de pertinence égal à 1 représente 26% des postes et nous comptons jusqu'à 40% de postes ayant un indicateur supérieur ou égal à 0,9. L'absence de ces critères lors de la négociation peut être pénalisant pour l'atelier montage.

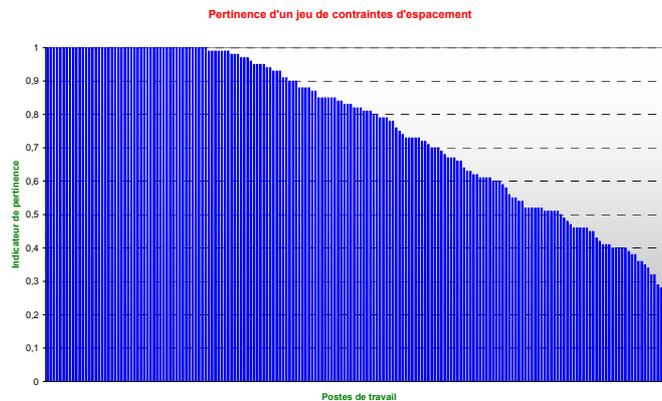


Figure 3.17 : Pertinence des critères sur les modèles (Sevel Nord – Mai 2006)

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 , calculant la surface couverte par les indicateurs de pertinences des postes de travail ayant au moins un pic de charge (équation 3.3).

$$I_p = \sum_{i=1}^{Nb_p} I_{p_i} \quad (3.3)$$

Avec Nb_p , nombre de postes de travail ayant au moins un pic de charge

Appliqué à notre exemple, les 11 contraintes d'espacement négociées ont un indicateur de pertinence global valant $I_p = 113,97$. Les deux critères non négociés ont un indicateur de pertinence global valant $I_p = 147,22$. Ces résultats laissent supposer que la négociation incluant ces deux critères fournirait un meilleur résultat que la négociation sur les 11 contraintes d'espacement négociées. D'ailleurs, l'indicateur de pertinence global devient $I_p = 161,95$ quand nous considérons les 13 critères simultanément. La prise en compte des 13 contraintes d'espacement augmente bien la couverture du besoin et identifie mieux les besoins en flexibilité de l'atelier montage.

Néanmoins, comme la valeur maximale de cet indicateur est 194, *i.e.* $I_{p_{\max}} = \sum_{i=1}^{194} 1 = 194$, il est peut-être possible de trouver une meilleure couverture. Mais, cela est laissé pour le moment à la discrétion des équilibreur.

3.3. DEFINITION DU RATIO D'UNE CONTRAINTE D'ESPACEMENT

Le critère d'une contrainte d'espacement identifie un ou plusieurs points critiques de la ligne d'assemblage. Et, l'espacement des véhicules provoquant des pics de charge est réalisé lors du séquençement des véhicules en respectant le plus possible un ratio N/P (Cf. 1.3.1.3).

Pour débiter, nous présenterons les différentes méthodes de calcul du ratio N/P d'une contrainte d'espacement ayant un critère défini pour un seul poste de travail. Puis, nous décrirons un procédé qui permet d'agrèger plusieurs ratios possibles pour une même contrainte d'espacement en un seul applicable simultanément à tous les postes de travail concernés. Notons que nous présentons en détail cet aspect de détermination des ratios car ces ratios sont définis indirectement avec la flexibilité installée.

3.3.1. SIMPLIFICATION DU PROBLEME

Dans l'approche classique du problème de séquençement des véhicules, nous considérons deux situations possibles : soit le véhicule possède l'option répondant au critère et le véhicule provoque un pic de charge, soit le véhicule ne possède pas l'option et le véhicule ne provoque pas un pic de charge.

Par conséquent, un poste de travail ayant une forte diversité de temps de traitement doit être simplifié à deux temps :

- T_{sup} , temps de traitement des véhicules strictement supérieur au temps de cycle, T_{cycle} . Dans la littérature, ce temps correspond au temps mis par un seul opérateur pour assembler l'option sur le véhicule.
- T_{inf} , temps de traitement des véhicules inférieur ou égal au temps de cycle, T_{cycle} . Ce temps correspond au temps de traitement d'un véhicule ne nécessitant pas l'assemblage de cette option pour ce même opérateur.

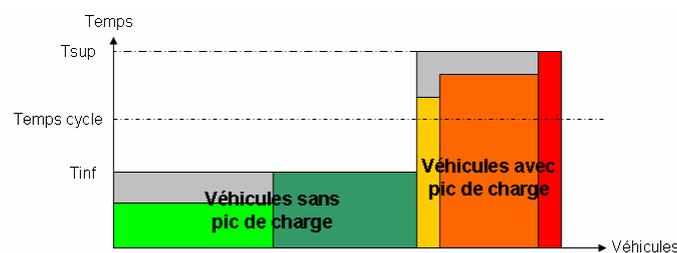


Figure 3.18 : Exemple de simplification des temps de traitement d'un poste de travail

La figure 3.18 présente un exemple de cette simplification. L'affectation des tâches sur ce poste de travail a conduit à avoir 5 temps de traitement différents (2 pour des véhicules sans pic de charge et 3 pour des véhicules avec un pic de charge). Mais, pour l'ordonnancement, nous devons considérer seulement deux temps de traitement (T_{inf} et T_{sup}).

3.3.2. **CALCUL DU RATIO D'UN POSTE DE TRAVAIL**

Actuellement, pour PSA Peugeot Citroën, le ratio N/P est calculé par la coordination de production (Cf. 2.1.4.3.1.). Ce ratio est calculé en fonction du nombre prévisionnel de véhicules soumis à la contrainte d'espacement exprimée par le bureau des méthodes. Or, les approches adoptées dans la littérature comme (Yano et Rachamadugu, 1991) ou, plus récemment, (Giard et Jeunet, 2006), calculent le ratio en fonction des informations liées au temps de traitement des véhicules ou de l'espace de travail d'un opérateur. Nous allons décrire et comparer ces deux approches.

3.3.2.1. LES DONNEES

Pour les méthodes que nous allons décrire ci-dessous, nous manipulons les données suivantes :

- Q_i , nombre de véhicules ayant un pic de charge au poste de travail i ,
- Q_{tot} , nombre de véhicules total,
- T_{cycle} , temps de cycle de la ligne d'assemblage,
- T_{inf_i} , temps de traitement d'un véhicule ne provoquant pas de pics de charge sur le poste de travail i ,
- T_{sup_i} , temps de traitement d'un véhicule provoquant un pic de charge sur le poste de travail i ,
- Min_i , limite minimale de l'espace de travail du poste de travail i avec $Min_i \leq 0$
- Max_i , limite maximale de l'espace de travail du poste de travail i avec $Max_i \geq T_{cycle}$

Et, nous allons calculer :

- N_i/P_i , ratio de la contrainte d'espacement associée au poste de travail i .

3.3.2.2. EN FONCTION DU VOLUME A PRODUIRE

Pour la coordination de production, le ratio N/P est calculé tel que le volume induit par le ratio soit simple et au « plus près » du volume à produire. Nous avons pu approximer le calcul de ce ratio à l'aide de la modélisation suivante (équation 3.4). L'idée de cette modélisation repose sur la distinction de deux cas : soit le volume est inférieur ou égal à 50%, soit le volume est supérieur à 50%. Dans le premier cas, une solution de type $1/P$ est possible et nous recherchons l'espacement maximal que nous pouvons avoir entre deux véhicules répondant au critère. Quant au deuxième cas, N doit être supérieur à 1 et nous recherchons une solution de type $N/(N+1)$, soit l'espacement maximal que nous pouvons avoir entre deux véhicules ne répondant pas au critère.

$$N = \left\lfloor \frac{Q_{tot} - 1}{Q_{tot} - Q} \right\rfloor \text{ et } P = \begin{cases} \left\lfloor \frac{Q_{tot}}{Q} \right\rfloor & \text{si } N = 1 \\ N + 1 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.4)$$

Le tableau 3.6 illustre l'application de ce modèle en considérant une liste de 500 véhicules ($Q_{tot} = 500$). Comme nous pouvons le noter, cette méthode ne définit que des ratios de la forme $1/P$ ou $(P-1)/P$. Dans la pratique, la coordination de production, en fonction de leur expérience, adopte parfois des ratios différents (ex : $2/5$).

Q_i	Ratio N_i/P_i	Q_i	Ratio N_i/P_i
101	1/4	251	2/3
...
125	1/4	333	2/3
126	1/3	334	3/4
...
166	1/3	375	3/4
167	1/2	376	4/5
...
250	1/2	400	4/5

Tableau 3.6 : Exemple de ratios calculés en fonction du volume à produire

L'utilisation de ces ratios n'est pas adaptée à la modélisation d'un opérateur en difficulté. En effet, seul le programme de production est utilisé. La charge de travail de l'opérateur est omise. La cohérence entre un non respect et une alerte serait garantie si le bureau des méthodes adaptait la charge de travail de l'opérateur au ratio calculé. Or, en pratique, cela n'est jamais réalisé.

3.3.2.3. EN FONCTION DE L'ESPACE DE TRAVAIL

Yano et Rachamadugu (1991) précisent les conditions nécessaires pour que le respect d'un ratio N/P permette à un opérateur de réaliser ses tâches sans sortir de son espace de travail. N ne doit pas excéder le nombre maximal de véhicules provoquant un pic de charge consécutifs que le poste de travail peut accepter, X (équation 3.5.b). Et, P doit être suffisamment grand pour permettre à l'opérateur d'avoir une charge moyenne sur une succession de P véhicules inférieure au temps cycle (équation 3.6).

Dans notre modélisation des alertes, comme l'opérateur commence au plus tôt à la limite minimale, Min , et ne doit pas dépasser la limite maximale, Max , l'opérateur peut accumuler un retard maximal, $R_{max} = (Max - Min) - T_{cycle}$ avec $Max - Min$ représentant l'espace de travail de l'opérateur et T_{cycle} le pas de travail sur lequel travaille un opérateur.

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

$$R_{inf} = T_{cycle} - T_{inf}.$$

La valeur de X doit être le plus grand entier respectant l'inéquation suivante :

$$X * R_{\text{sup}} \leq R_{\text{max}} \quad (3.5.a)$$

soit

$$X = \left\lfloor \frac{R_{\text{max}}}{R_{\text{sup}}} \right\rfloor \quad (3.5.b)$$

$$\text{Avec } R_{\text{max}} = (Max - Min) - T_{\text{cycle}}, \quad R_{\text{sup}} = T_{\text{sup}} - T_{\text{cycle}}$$

Puis, en fonction du choix de la valeur de N ($1 \leq N \leq X$), la valeur de P doit être suffisamment grande pour permettre à l'opérateur d'avoir une charge moyenne sur une succession de P véhicules inférieure au temps cycle (équation 3.6).

$$\frac{N * T_{\text{sup}} + (P - N) * T_{\text{inf}}}{P} \leq T_{\text{cycle}} \Leftrightarrow P \geq N * \frac{T_{\text{sup}} - T_{\text{inf}}}{T_{\text{cycle}} - T_{\text{inf}}} \Leftrightarrow P \geq N * \frac{T_{\text{sup}} - T_{\text{inf}}}{R_{\text{inf}}} \quad (3.6)$$

$$\text{Avec } 1 \leq N \leq X, \quad R_{\text{inf}} = T_{\text{cycle}} - T_{\text{inf}}$$

Exemple : Soit $Nb_op = 1$, $T_{\text{cycle}} = 1$, $T_{\text{inf}} = 0.8$, $T_{\text{sup}} = 1.3$, $Min = -0.3$ et $Max = 1.5$

$$R_{\text{max}} = 1.5 - (-0.3) - 1 * 1 \Leftrightarrow R_{\text{max}} = 0.8$$

$$R_{\text{sup}} = 1.3 - 1 * 1 \Leftrightarrow R_{\text{sup}} = 0.3$$

$$R_{\text{inf}} = 1 * 1 - 0.8 \Leftrightarrow R_{\text{inf}} = 0.2$$

Selon l'équation (3.5.b), nous pouvons placer au plus $X = \left\lfloor \frac{0.8}{0.3} \right\rfloor = 2$ véhicules

provoquant un pic de charge consécutifs sans sortir de l'espace de travail de l'opérateur. Il est donc possible de choisir N entre 1 et 2.

$$\text{Si } N = 1, \quad P \geq N * \frac{T_{\text{sup}} - T_{\text{inf}}}{R_{\text{inf}}} \Leftrightarrow P \geq 1 * \frac{1.3 - 0.8}{0.2} \Leftrightarrow P \geq 2.5, \text{ les ratios possibles sont } 1/3,$$

1/4, 1/5, ...

$$\text{Si } N = 2, \quad P \geq N * \frac{T_{\text{sup}} - T_{\text{inf}}}{R_{\text{inf}}} \Leftrightarrow P \geq 2 * \frac{1.3 - 0.8}{0.2} \Leftrightarrow P \geq 5, \text{ les ratios possibles sont } 2/5,$$

2/6, 2/7, ...

L'approche que nous venons de développer précise les conditions minimales permettant d'avoir un ratio représentatif de la charge de travail d'un opérateur. Le choix du ratio à appliquer appartient aux équilibristes. L'approche de Giard et Jeunet (2006) diffère dans le calcul de la fenêtre du ratio, P .

Comme dans Yano et Rachamadugu (1991), un véhicule provoquant un pic de charge occasionne pour l'opérateur un retard de R_{sup} supplémentaire et un véhicule sans pic de charge permet à l'opérateur de récupérer un retard de R_{inf} .

A partir de ces informations, Giard et al (2006) définissent $N = X$ comme étant le nombre maximal de véhicules successifs provoquant un pic de charge sans que l'opérateur n'excède le retard maximal R_{max} , puis, $P - N$ comme étant le nombre de véhicules ne provoquant pas de pic de charge nécessaires pour absorber un pic de charge (équation 3.7). L'idée étant de pouvoir replacer à nouveau un véhicule avec un pic de charge le plus tôt possible.

$$N = \left\lfloor \frac{R_{max}}{R_{sup}} \right\rfloor \text{ et } P = N + \left\lceil \frac{R_{sup}}{R_{inf}} \right\rceil \quad (3.7)$$

$$\text{Avec } R_{max} = (Max - Min) - T_{cycle}$$

$$R_{sup} = T_{sup} - T_{cycle}$$

$$R_{inf} = T_{cycle} - T_{inf}$$

$$\text{Avec le même exemple que ci-dessus, } N = \left\lfloor \frac{0.8}{0.3} \right\rfloor = 2 \text{ et } P = 2 + \left\lceil \frac{0.3}{0.2} \right\rceil = 4$$

Le respect de cette contrainte peut, quand même, conduire à l'apparition d'une alerte non signalée par un non respect, quand $N > 1$, comme nous l'avons illustré sur la figure 3.19. Le problème vient du fait que P a été calculé pour récupérer un seul pic de charge, alors que $N = 2$ permet qu'il y en ait 2 consécutifs.

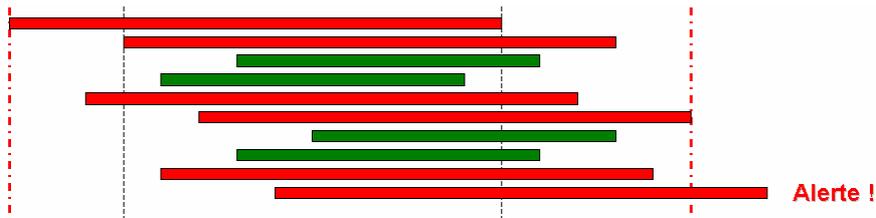


Figure 3.19 : Exemple d'application du ratio N/P selon Giard et Jeunet

Ceci n'est bien sûr pas satisfaisant et pour corriger ce défaut, il suffit de définir $P - N$ comme étant le nombre de véhicules ne provoquant pas de pic de charge nécessaire pour absorber une succession de N véhicules provoquant un pic de charge (équation 3.8) ou pour absorber le retard maximal (équation 3.9).

$$N = \left\lfloor \frac{R_{max}}{R_{sup}} \right\rfloor \text{ et } P = N + \left\lceil \frac{N * R_{sup}}{R_{inf}} \right\rceil \quad (3.8)$$

$$N = \left\lfloor \frac{R_{\max}}{R_{\sup}} \right\rfloor \text{ et } P = N + \left\lceil \frac{R_{\max}}{R_{\inf}} \right\rceil \quad (3.9)$$

L'équation (3.8) correspond aux valeurs limites de l'approche de Yano et Rachamadugu (1991) comme nous allons le montrer ci-dessous.

Par définition, dans l'approche de Giard et Jeunet (2006), $N_i = X_i$.

Comme $\frac{T_{\sup} - T_{\inf}}{R_{\inf}} = \frac{R_{\sup}}{R_{\inf}} + 1$, $P \geq N * \frac{T_{\sup} - T_{\inf}}{R_{\inf}} \Leftrightarrow P \geq N * \frac{R_{\sup}}{R_{\inf}} + N$. La plus petite valeur

entière de P possible correspond à la valeur suivante $\left\lceil N * \frac{R_{\sup}}{R_{\inf}} + N \right\rceil$, soit $N + \left\lceil \frac{N * R_{\sup}}{R_{\inf}} \right\rceil$ car N est entier.

Les équations (3.8) et (3.9) conduisent à des capacités maximales de production différentes pour le poste de travail. Ces capacités maximales correspondent au nombre maximal de véhicules provoquant un pic de charge que nous pouvons engager sur ce poste en respectant le ratio défini par l'équation 3.10.

$$Q_{\max} = \left\lfloor \frac{N}{P} * Q_{\text{tot}} \right\rfloor \quad (3.10)$$

Toujours avec le même exemple que précédemment :

Selon (3.8) et (3.10), $N = \left\lfloor \frac{0.8}{0.3} \right\rfloor = 2$, $P = 2 + \left\lceil \frac{2 * 0.3}{0.2} \right\rceil = 5$ et $Q_{\max} = \left\lfloor \frac{2}{5} * 300 \right\rfloor = 120$

Selon (3.9) et (3.10), $N = \left\lfloor \frac{0.8}{0.3} \right\rfloor = 2$, $P = 2 + \left\lceil \frac{0.8}{0.2} \right\rceil = 6$ et $Q_{\max} = \left\lfloor \frac{2}{6} * 300 \right\rfloor = 100$

Les calculs selon les équations (3.8) et (3.9) garantissent l'absence d'alertes. Mais, le calcul du ratio N/P selon l'équation 3.8, comme le montre notre exemple, nous permet d'engager un volume plus important que celui obtenu par l'équation 3.9. Nous retiendrons donc la méthode fournie par l'équation (3.8).

Nous pouvons noter que ces approches n'utilisent pas le nombre de véhicules de chacun des deux temps. Aussi, le bureau des méthodes, lors de l'équilibrage, doit s'assurer que la répartition des tâches permette de disposer d'un ratio compatible avec le volume prévisionnel.

3.3.2.4. PERTINENCE DE LA CONFIGURATION DU PIRE DES CAS

Pour les modèles (équation 3.8) et (équation 3.9), la garantie que le respect du ratio N_i/P_i ne provoque pas d'alertes repose sur le fait que les postes avec un pic de charge traitent

seulement deux types de véhicules avec des temps de traitement T_{inf} et T_{sup} . En pratique, ces postes de travail sont rares et la diversité des véhicules à fabriquer constitue un facteur de complexité supplémentaire. A Poissy sur la ligne d'assemblage L2 au mois de mai 2005, nous avons 8% des postes de travail (soit 11 sur 132) répondant à cette condition et seulement 1% à Sevel Nord au mois de Mai 2005 (soit 2 sur 212).

Par conséquent, nous pouvons seulement demander aux équilibreur de faire en sorte de limiter les différences de temps de traitement pour les deux catégories de véhicules. Si cela n'est pas possible, la modélisation la plus prudente est celle correspondant à la situation au pire des cas, *i.e.* on choisit T_{inf} comme le maximum des temps de traitement des véhicules inférieur ou égal au temps de cycle et T_{sup} comme le maximum des temps de traitement des véhicules strictement supérieur au temps de cycle (Figure 3.18).

Mais, cette modélisation peut être trop contraignante. Par conséquent, il est possible d'envisager d'autres possibilités pour évaluer ces deux temps comme le temps minimal (cas très optimiste), la moyenne des temps de traitement des véhicules ou d'autres ...

En pratique, l'équilibreur penche vers le pire des cas tout en souhaitant pouvoir exclure les véhicules faiblement représentés pénalisant le calcul du ratio. Par exemple sur la figure 3.20, la barre rouge à droite du graphique représente une population assez faible et elle pénalise pourtant le calcul du ratio. Avec cette population de véhicules, le ratio est 1/2. Sans cette population, le ratio peut devenir 2/3. Avec la deuxième solution, il est évident que l'équilibreur assume le risque d'avoir des alertes malgré le respect de la contrainte.

3.3.3. CALCUL D'UN RATIO POUR UNE CONTRAINTE D'ESPACEMENT

La définition d'un critère d'une contrainte d'espacement montre qu'un même critère peut être pertinent pour plusieurs postes de travail. Le calcul du ratio d'un poste de travail s'effectue en fonction de l'espace de travail et de la charge de travail de l'opérateur (Cf. 3.3.2). Par conséquent, il est possible que, pour un même critère, il faille respecter simultanément des ratios différents.

Comme le montre la pratique chez PSA Peugeot Citroën (Joly, 2005), Renault (Nguyen et al., 2005), BMW et Audi, une contrainte d'espacement a un et un seul ratio. De fait, le ratio à appliquer doit être un ratio compatible et commun à l'ensemble des postes de travail concernés. Ce ratio doit également permettre, si il est respecté, de produire le plus grand nombre de véhicules possibles.

La définition d'un ratio compatible sera abordée plus en détails dans le chapitre 4. En attendant, nous illustrons simplement le concept avec la figure 3.20. Pour une contrainte d'espacement appliquée aux moteurs HDI, le ratio 1/2 est compatible avec le ratio 2/4 car quelle que soit la séquence de véhicules respectant le ratio 1/2, elle respecte également le ratio 2/4. Par contre, le ratio 2/4 n'est pas compatible avec le ratio 1/2 car il existe une séquence de véhicules respectant le ratio 2/4 qui ne respecte pas le ratio 1/2. Tout comme le ratio 1/3 n'est pas compatible avec 1/4.



Figure 3.20 : Exemple de ratios compatibles et non compatibles

Pour chacun des postes de travail i contraint par la contrainte d'espacement c , nous évaluons le ratio à appliquer selon l'équation (3.8). Pour chacun des ratios différents, nous construisons l'ensemble de ces ratios compatibles Rc_{N_i/P_i} ¹³. Puis, nous pouvons sélectionner, parmi l'ensemble des ensembles de ratios compatibles, Cc_c (équation 3.11), un ratio commun à tous les postes de travail. Pour disposer de la plus grande flexibilité possible, c'est-à-dire, produire le plus grand nombre de véhicules sans déclencher d'alertes, il est possible de choisir le ratio N_c/P_c tel que ce ratio ait le rapport le plus élevé (équation 3.12).

$$Cc_c = \bigcap_{i \in Pc_c} Rc_{N_i/P_i} \quad (3.11)$$

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

$$N_c/P_c = \max_{x \in Cc_{N_p/P_p}} (x) \quad (3.12)$$

Par exemple, considérons deux postes de travail contraints par la contrainte d'espacement « HDI ». 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 $Rc_{2/5} = \{2/5, 2/6, 2/7, \dots, \dots\}$.

¹³ Cet ensemble sera décrit ultérieurement dans le chapitre 4. *Les interactions de contraintes*

1/3, 1/4, 1/5, ... }. L'ensemble des ratios compatibles communs aux deux postes correspond à $C_c = \{1/3, 1/4, 1/5, \dots\}$. 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. Pour conclure, il faudra donc appliquer une contrainte d'espacement portant sur les moteurs HDI avec un ratio 1/3.

3.3.4. INDICATEUR DE NON RESPECT D'UNE CONTRAINTE D'ESPACEMENT

Nous avons décrit les contraintes d'espacement. Maintenant, nous allons aborder le respect de ces contraintes d'espacement par les outils de séquençement. La résolution du problème de séquençement des véhicules, qu'il soit mono ou multi-objectifs, utilise pour chaque critère à optimiser une fonction d'évaluation. Cette fonction d'évaluation repose sur la définition d'un indicateur d'espacement. En annexe A, nous avons décrit et comparé les indicateurs d'espacement utilisés par Renault et par PSA Peugeot Citroën. A l'issue de cette comparaison, nous avons opté pour l'utilisation de l'indicateur d'espacement actuellement utilisé par PSA Peugeot Citroën, $I_{esp-PSA_i}$ (Joly, 2005).

Cet indicateur compte le nombre de véhicules ne respectant pas la contrainte d'espacement i et s'obtient par l'équation (3.13) :

$$I_{esp-PSA_i} = \sum_{j=1}^{Q_{tot}} \left(x_{j,i} * \min \left(\max \left(-N_i + \sum_{k=j-P_i+1}^j x_{k,i}, 0 \right), 1 \right) \right) \quad (3.13)$$

Q_{tot} , le nombre de véhicules dans la séquence,

N_i/P_i , le ratio de la contrainte d'espacement i ,

$x_{j,i} = 1$ si le véhicule à la position j est soumis à la contrainte d'espacement i , 0 sinon.

La figure 3.21 illustre le calcul de l'indicateur d'espacement PSA pour une contrainte d'espacement sur les véhicules haut de gamme avec un ratio 1/5 ($I_{esp-PSA_i} = 2$). Sous la séquence de véhicules, nous avons représenté les fenêtres glissantes qui présentent un non respect (« 1 ») ou non (« 0 »). Les véhicules ne respectant pas un ratio ne sont comptés qu'une seule fois.

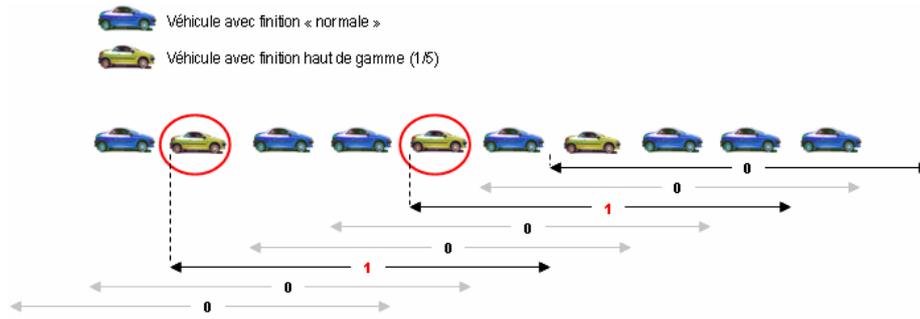


Figure 3.21 : Exemple d'application de l'indicateur d'espacement PSA

L'évaluation d'une séquence de véhicules est obtenue en agréant les formules (équation 3.13) en une somme pondérée comme le décrit l'équation 3.14. Le poids attribué à chacune des contraintes d'espacement est conditionné par l'importance des contraintes d'espacement les unes par rapport aux autres. Le problème du séquençage de véhicules cherche donc à minimiser I_{esp} .

$$I_{esp} = \sum_{j=1}^{Nb_c} (\omega_j * I_{esp_j}) \quad (3.14)$$

Où Nb_c est le nombre de contraintes d'espacement considérées

ω_j est la pondération de la contrainte d'espacement j

(choisie selon l'importance de la contrainte).

Dans le cas où tous les poids sont identiques, nous pouvons les choisir unitaires, *i.e.* $\omega_j = 1$, et l'équation 3.14 consiste alors à compter le nombre de non respects présents dans la séquence.

3.4. RESULTATS NUMERIQUES

Dans cette partie, nous ne cherchons pas à améliorer les algorithmes de séquençage existants, ni à obtenir une solution optimisant le nombre d'opérateurs en difficulté, ni à minimiser le nombre de non respects. Nous montrons comment notre méthode permet d'améliorer la corrélation entre le nombre de non respects et le nombre d'opérateurs en difficulté.

Pour valider l'approche décrite dans ce chapitre, nous avons sélectionné 30 postes de travail sur le site de Sevel Nord ayant au moins un pic de charge et une liste de 719 véhicules produits le 23 Mai 2006. Tous ces postes de travail comptent un seul opérateur. Les limites minimales et maximales de ces postes de travail nous ont été communiquées par l'équilibreur.

Le temps cycle vaut 14800 (les temps sont exprimés en dix millièmes de minutes : 14800 signifie 1,48 minute, soit 1 minute et 29 secondes).

Pour évaluer la corrélation entre le nombre de non respects et le nombre d'opérateurs en difficulté, nous avons mesuré le nombre de véhicules ayant simultanément un non respect et une alerte. Pour identifier les non respects, nous avons utilisé 3 jeux de contraintes d'espacement différents :

- Une contrainte d'espacement par poste de travail ayant un pic de charge,
- La liste des contraintes d'espacement négociées au mois de Mai,
- Une liste de contraintes d'espacement choisies avec l'aide de la matrice colorée des relations.

Pour vérifier que la minimisation du nombre de non respects aboutit à une réduction du nombre d'alertes, nous avons comparé le nombre d'alertes, le nombre de non respects et le nombre de véhicules ayant simultanément un non respect et une alerte avec deux séquences de véhicules :

- La séquence de véhicules réellement engagée dans l'atelier montage (Entrée Montage). Elle prend en compte les aléas de production de l'atelier de ferrage et de l'atelier de peinture. Elle minimise le nombre de non respects des contraintes d'espacement négociées en prenant en compte les véhicules au fil de l'eau avec un stock limité.
- Une séquence de véhicules minimisant le nombre de non respects du jeu de contraintes d'espacement considéré, séquence créée avec l'outil de séquençement du groupe PSA Peugeot Citroën (Séquençement).

3.4.1. UNE CONTRAINTE D'ESPACEMENT PAR POSTE

Dans ce premier cas, nous avons donc défini 30 contraintes d'espacement, soit une contrainte d'espacement par poste de travail (Tableau 3.7). Les valeurs T_{inf_i} et T_{sup_i} correspondent à la configuration au pire des cas comme nous l'avons décrite dans la partie 3.1. Puis, le ratio a été calculé selon l'équation 3.8.

Nous précisons également que le nombre de véhicules provoquant un pic de charge sur chacun de ces postes de travail est inférieur au volume induit par le respect du ratio. Par exemple, pour le poste de travail 5LH1102D, pris en compte individuellement, le ratio 2/5 permet de produire au plus 40% de véhicules provoquant un pic de charge sans non respect.

Ce jour-là, nous avons dénombré 278 véhicules provoquant un pic de charge sur ce poste de travail pour 719 véhicules au total, soit 38,7%, ce qui est inférieur à 40%.

Poste	Min_i	Max_i	T_{inf_i}	T_{sup_i}	Ratio
5LH1102D	-7400	22200	4200	5700	2/5
5LH1104G	-7400	22200	3010	2190	6/11
5LH1207D	-7400	22200	6000	7000	2/5
5LH2112D	-7400	22200	3610	4570	3/7
5LH2114G	-7400	22200	1970	2020	7/15
5LH2218G	0	15300	2600	400	1/2
5LH2219G	-7400	22200	6700	2100	7/10
5LH2420G	-7400	22200	6900	2580	5/7
5LH2421G	-7400	22200	8800	7900	1/2
5LH2424D	-7400	22200	4500	4700	3/7
5LH2526D	-7400	22200	7900	8200	1/3
5LH2529G	-7400	22200	5630	1860	7/10
5LH3237D	0	22200	3900	4300	1/3
5LH3452G	-7400	22200	6500	6700	2/5
5LH4103D	-7400	22200	8400	3100	4/6

Poste	Min_i	Max_i	T_{inf_i}	T_{sup_i}	Ratio
5LH4209D	-7400	22200	13000	12600	1/2
5LH4519D	0	31300	14800	14600	1/2
5LH4521D	-7400	22200	13900	7000	2/4
5LH5529D	-7400	22200	11100	3500	4/6
5LH6234G	-7400	22200	10500	3700	4/6
5LH6338G	-7400	22200	1000	2200	6/20
5LM1101M	-7400	22200	690	2410	6/27
5LM1313G	-7400	22200	3320	3290	4/8
5LM2434G	-7400	22200	4210	5870	2/5
5LM2535D	-7400	22200	10000	6200	2/4
5LM2540G	-7400	25200	3200	3200	5/10
5LM3211G	-7400	22200	3350	3000	4/8
5LM3321D	-7400	22200	3870	770	19/23
5LM3426G	0	32570	200	1500	11/94
5LM4345M	-7400	22200	200	500	29/102

Tableau 3.7 : Description des postes et des contraintes d'espace

La figure 3.22 illustre les résultats obtenus avec ce jeu de contraintes d'espace. Pour chacune des 2 séquences de véhicules, nous avons compté le nombre de non respects (équation 3.14), le nombre d'alertes déclenchées (SPELEO-2), et le nombre de fois qu'apparaît simultanément une alerte et un non respect sur le même véhicule pour le même poste de travail.

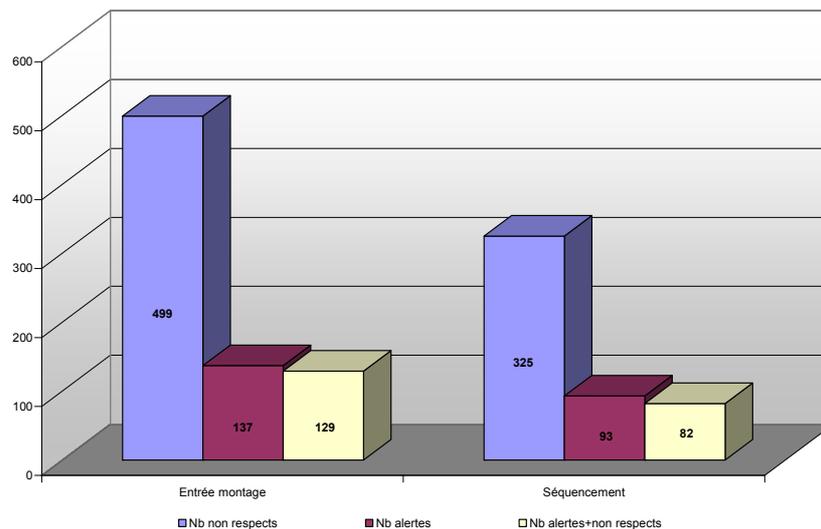


Figure 3.22 : Comparaison des alertes et des non-respects

Dans le tableau 3.8, la ligne « Nombre d'apparitions » contient les valeurs utilisées pour dessiner le graphique en barre de la figure 3.22, c'est-à-dire, le nombre d'alertes, le nombre de non respects et le nombre d'alertes identifiées par un non respect (sur le même

poste). Sur la ligne « Nombre de postes », nous avons indiqué le nombre de postes de travail ayant au moins un non respect, une alerte et une alerte et un non respect simultanément. Puis, le « Nombre de véhicules » précise le nombre de véhicules concernés dans ces 3 cas.

	Entrée Montage			Séquencement		
	Non respects	Alertes	Alertes + Non respects	Non respects	Alertes	Alertes + Non respects
Nombre d'apparitions	499	137	129	325	93	82
Nombre de postes	17	4	4	21	9	4
Nombre de véhicules	282	125	125	189	88	82

Tableau 3.8 : Synthèse des résultats obtenus

Dans le tableau 3.8, pour la liste des véhicules réellement engagés au montage, le nombre de non respects est très élevé car, d'une part, nous comptons 30 contraintes d'espacement et, d'autre part, l'engagement ne cherchait pas à respecter les contraintes considérées dans ce premier cas. Ces chiffres ne sont donc pas très significatifs.

Par contre, ceux sur les alertes sont très intéressants. Nous pouvons constater sur la première ligne du tableau 3.8 et sur la figure 3.22 que la réduction du nombre de non respects entraîne une réduction du nombre d'alertes (de 137 à 93). Les alertes sans non respect sont rares en entrée montage (resp. dans le séquencement) et elles sont au nombre de $137-129 = 8$ (resp. $93-82 = 11$). Ces écarts sont encore plus réduits lorsqu'ils sont agrégés pour les véhicules. Les non respects sans alertes sont très nombreux en raisons des postes de travail n'ayant pas de temps de traitement homogènes comme pour le poste de travail 5LH3237D. A contrario, le poste de travail 5LH2218G présente une corrélation parfaite entre les alertes et les non respects. Le tableau 3.9 détaille les indicateurs évalués pour ces deux postes de travail et la figure 3.23 détaille leurs différents temps de traitement. Nous constatons que le poste de travail 5LH2218G est très proche d'un poste de travail à 2 temps ce qui explique les résultats très satisfaisants pour ce poste.

	Entrée Montage			Séquencement		
	Non respects	Alertes	Alertes + Non respects	Non respects	Alertes	Alertes + Non respects
5LH3237D	60	0	0	59	0	0
5LH2218G	60	60	60	54	54	54

Tableau 3.9 : Comparaison des postes de travail 5LH3237D et 5LH2218G

Temps	Nombre de véhicules
700	5
10400	39
10900	471
15200	121
15300	7
16900	2
19100	74

Poste de travail 5LH3237D

Temps	Nombre de véhicules
10700	82
12200	298
15200	339

Poste de travail 5LH2218G

Figure 3.23 : Description des postes de travail 5LH3237D et 5LH2218G

3.4.2. COMPARAISON DE DEUX JEUX DE CONTRAINTES D'ESPACEMENT

La première configuration (une contrainte d'espacement par poste de travail) n'est pas réaliste lorsque le nombre de postes de travail ayant au moins un pic de charge est élevé. En effet, pour le site de Sevel Nord, en mai 2006, il faudrait définir 194 contraintes d'espacement, ceci est inconcevable. On ne peut pas chez PSA Peugeot Citroën encadrer la variation commerciale par 194 items, ce n'est pas acceptable par les marques. Les systèmes d'information du groupe PSA Peugeot Citroën acceptent au plus 30 contraintes d'espacement. Aussi, il est nécessaire de définir un jeu de contraintes d'espacement représentatif des postes de travail de la ligne d'assemblage. Pour cela, la matrice colorée des relations que nous avons décrite dans la partie 3.2 trouve toute son utilité comme nous allons le démontrer à l'aide de ces deux configurations.

3.4.2.1. LE JEU DES CONTRAINTES D'ESPACEMENT NEGOCIEES

Les critères et les ratios des contraintes d'espacement négociées sont décrits dans le tableau 3.10.

Code	Libellé	Ratio négocié
DAD	Direction à droite	1/4
PLC	Porte latérale de chargement	1/4
ABR	Anti-blocage des roues	2/6
PB04	Porte battante vitrée	1/2
CMB	Combi	1/4
TO	Toit Ouvrant	1/17
FOND	Fond de cabine	1/2
3RG	3 ^{ème} rangée de siège	2/3
SIE	Siège électrique	1/4
BVA	Boîte de vitesse automatique	1/10
ESS	Moteur Essence	1/10

Tableau 3.10 : Contraintes d'espacement négociées du mois de Mai 2006 à Sevel Nord

Nous avons représenté graphiquement les indicateurs de pertinence des postes de travail pour ces critères dans la figure 3.24. En abscisse, figurent les postes de travail cités dans le tableau 3.7 triés par ordre décroissant de leur indicateur de pertinence. Nous avons indiqué entre parenthèse la contrainte d'espace qui est la plus pertinente.

Les 11 contraintes d'espace négociées pour ces 30 postes de travail ont un indicateur de pertinence de $I_p = 16,96$ (équation 3.3), soit 56% de la couverture optimale ($I_{p_{opt}} = 30$).

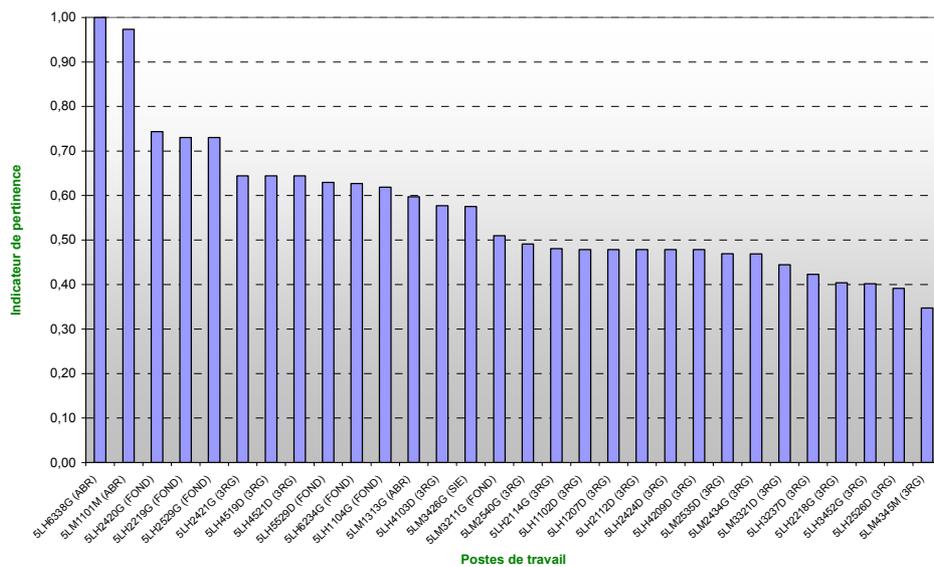


Figure 3.24 : Pertinence des critères des contraintes d'espace négociées à Sevel Nord

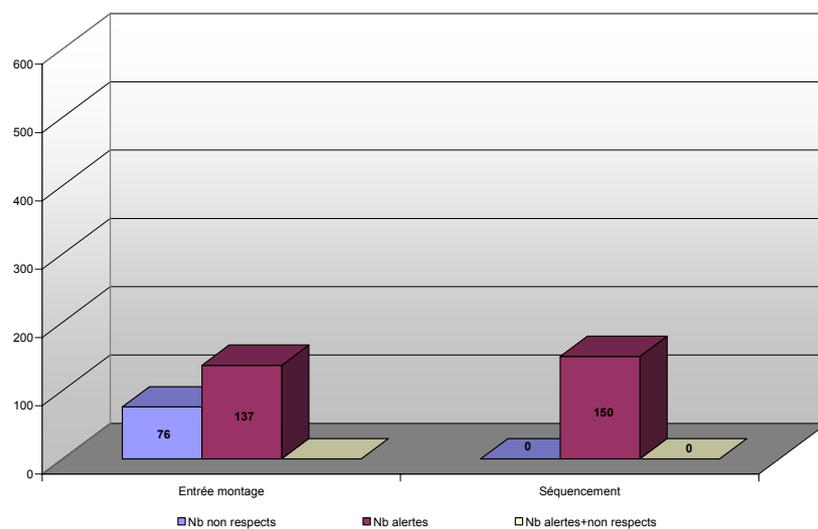


Figure 3.25 : Résultat avec les contraintes d'espace négociées

La figure 3.25 illustre les résultats obtenus avec les contraintes d'espace négociées. Pour chacune des 2 séquences de véhicules, nous avons compté le nombre de non

respects (équation 3.14), le nombre d’alertes déclenchées (SPELEO-2) et le nombre de fois qu’apparaît une alerte et un non respect sur le même véhicule.

	Entrée Montage			Séquencement		
	Non respects	Alertes	Alertes + Non respects	Non respects	Alertes	Alertes + Non respects
Nombre d'apparitions	76	137	0	0	150	0
Nombre de véhicules	76	125	0	0	101	0

Tableau 3.11 : Synthèse des résultats obtenus

Comme nous pouvons le constater sur la première ligne du tableau 3.11 et sur la figure 3.25, la réduction du nombre de non respects entre « Entrée Montage » et « Séquencement » n’entraîne pas une réduction du nombre d’alertes (76 non respects pour 137 alertes contre 0 non respect pour 150 alertes). Et, les alertes sans non respect et les non respects sans alertes sont très importants.

3.4.2.2. UN JEU DE CONTRAINTES D’ESPACEMENT ADAPTE

En utilisant la matrice colorée des relations, nous avons identifié 11 contraintes d’espacement pour garder un nombre de contraintes identique à celui de la réalité (Tableau 3.12). Pour obtenir ces 11 contraintes d’espacement, nous sommes partis des 30 contraintes d’espacement du premier cas (Tableau 3.7). Puis, nous avons éliminé progressivement les contraintes d’espacement redondantes, puis celles qui étaient les moins pertinentes.

Dans le tableau 3.12, le critère d’une contrainte d’espacement a été défini pour caractériser tous les véhicules provoquant un pic de charge sur un seul poste de travail. Par exemple, la contrainte d’espacement 5LH1102D du tableau 3.12 représente tous les véhicules ayant un pic de charge sur le poste de travail 5LH1102D. Le ratio que nous avons choisi pour la contrainte d’espacement appartient à l’ensemble des ratios compatibles et communs aux postes de travail contraints par cette contrainte (équation 3.11).

Code	Ratio choisi
5LH1102D	2/5
5LH1207D	1/2
5LH1104G	1/2
5LM1313G	4/8
5LM3426G	1/9
5LM3321D	4/5
5LH4519D	1/2
5LH2218G	1/2
5LM3211G	4/8
5LM1101M	2/9
5LH2420G	5/7

Tableau 3.12 : Contraintes d’espacement identifiées par la matrice colorée

La figure 3.26 représente graphiquement les indicateurs de pertinence des postes de travail qui nous ont conduits à définir ces 11 contraintes d'espace. En abscisse, figurent les postes de travail cités dans le tableau 3.7 triés par ordre décroissant de leur indicateur de pertinence.

Ces 11 contraintes d'espace pour ces 30 postes de travail ont un indicateur de pertinence de $I_p = 28,80$ (équation 3.3), soit 96% de la couverture optimale ($I_{p_{opt}} = 30$). Avec ces 11 contraintes d'espace, les postes de travail sont donc mieux pris en compte par l'ordonnement des véhicules.

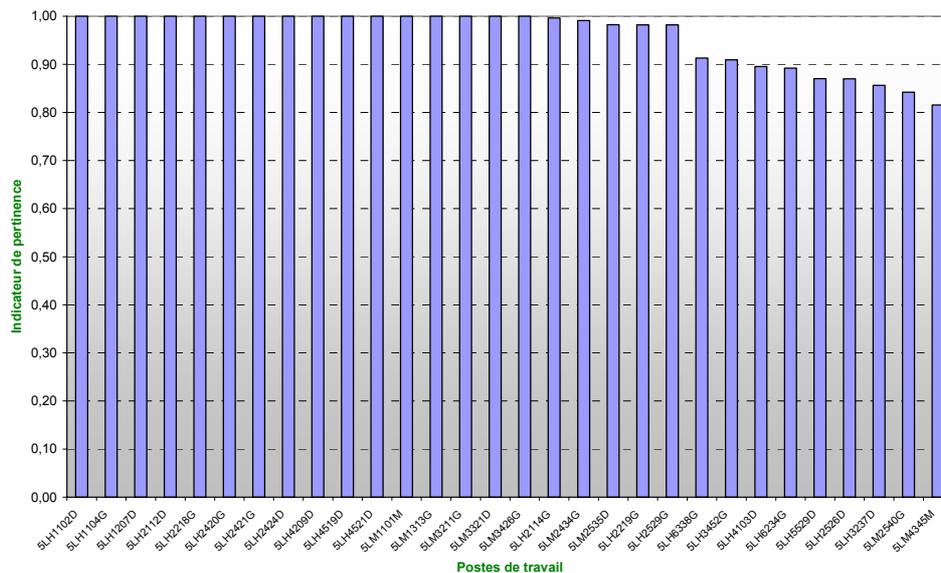


Figure 3.26 : Pertinence des critères des contraintes d'espace identifiées

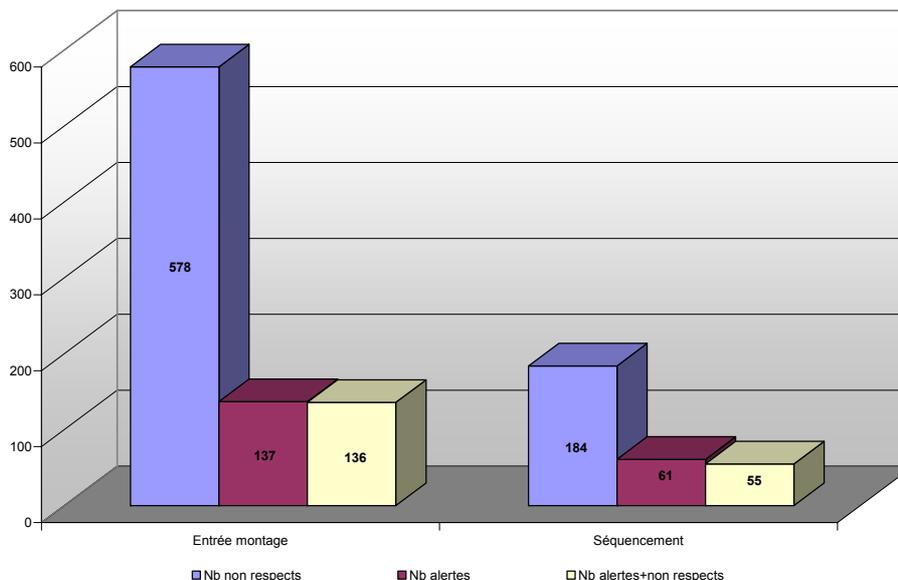


Figure 3.27 : Résultat avec les contraintes d'espace négociées

La figure 3.27 illustre les résultats obtenus avec les contraintes d'espacement identifiées. Pour chacune des 2 séquences de véhicules, nous avons compté le nombre de non respects (équation 3.14), le nombre d'alertes déclenchées (SPELEO-2) et le nombre de fois qu'apparaît une alerte et un non respect sur le même véhicule.

	Entrée Montage			Séquencement		
	Non respects	Alertes	Alertes + Non respects	Non respects	Alertes	Alertes + Non respects
Nombre d'apparitions	578	137	136	184	61	55
Nombre de véhicules	396	125	124	182	58	54

Tableau 3.13 : Synthèse des résultats obtenus

Comme dans le premier cas (une contrainte d'espacement par poste de travail), pour la liste des véhicules réellement engagés au montage, le nombre de non respects est très élevé car l'engagement ne cherche pas à respecter les contraintes considérées ici.

En revanche à nouveau, l'analyse des alertes est intéressante. Nous pouvons constater sur la première ligne du tableau 3.13 et sur la figure 3.27 que la réduction du nombre de non respects entraîne une réduction très significative du nombre d'alertes (61 au lieu de 137). De plus, les alertes sans non respect sont alors négligeables. Néanmoins, comme nous l'avons abordé précédemment avec la figure 3.23, des non respects sans alerte surviennent lorsque les temps de traitement sur un poste de travail ne sont pas homogènes.

3.4.2.3. SYNTHÈSE

Pour 30 postes de travail de la ligne d'assemblage de Sevel Nord, nous avons comparé l'influence du respect des contraintes d'espacement sur le déclenchement des alertes pour deux ensembles de contraintes d'espacement : les contraintes d'espacement négociées et un autre que nous avons choisi en utilisant la matrice colorée et les indicateurs de pertinence.

Le jeu des contraintes négociées correspond à 56% de la couverture optimale et compte un seul poste de travail contraint par une contrainte d'espacement. Le jeu des contraintes choisies avec notre méthode correspond, quant à lui, à 96% de la couverture optimale et compte 17 postes de travail contraints par au moins une contrainte d'espacement. Par conséquent, le deuxième jeu représente *a priori* mieux les véhicules provoquant des pics de charge à espacer lors du séquencement.

Pour la liste des véhicules engagés dans l'atelier montage et avec le jeu des contraintes négociées, les 76 non respects des contraintes d'espacement n'identifient aucune des 137 alertes déclenchées. Avec le jeu des contraintes choisies avec notre méthode, sur les 137

alertes déclenchées, 136 correspondent à au moins un des 578 non respects. Comme nous pouvons le constater, nous réduisons avec notre méthode les alertes non identifiées par un non respect.

	Jeu de contraintes négocié			Jeu de contraintes adapté		
	Non respects	Alertes	Alertes + Non respects	Non respects	Alertes	Alertes + Non respects
Nombre d'apparitions	0	150	0	184	61	55
Nombre de véhicules	0	101	0	182	58	54

Tableau 3.14 : Comparaison des jeux de contraintes d'espace

Le tableau 3.14 reprend les résultats des tableaux 3.10 et 3.12 pour les listes séquencées. Le deuxième jeu de contraintes d'espace semble difficile à respecter puisque nous comptons 184 non respects contre 0. Pourtant, nous constatons que ce deuxième jeu est nettement plus efficace que le premier. Tout d'abord, le nombre d'alertes passe de 150 à 61 soit une réduction de 59,3%. Puis, le nombre d'alertes ne correspondant pas à au moins un non respect passe de 150 à $61-55=6$ soit une réduction de 96%.

Ces résultats montrent l'importance de la définition des critères et des ratios des contraintes d'espace dans la réduction des alertes et dans l'anticipation des interventions d'opérateurs polyvalents.

3.5. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons proposé une méthode identifiant les postes de travail nécessitant de la flexibilité pour faciliter le séquençage des véhicules. Ainsi, nous avons décrit la modélisation d'un opérateur en difficulté, nous avons formalisé la relation entre une contrainte d'espace et un poste de travail, et nous avons présenté une méthode pour calculer les ratios à respecter lors du séquençage des véhicules.

Les véhicules provoquant un pic de charge sur un poste de travail sont à l'origine des interventions d'un opérateur polyvalent chez PSA Peugeot Citroën ou d'un arrêt de ligne chez Toyota. Pour éviter de rencontrer une de ces situations, ces véhicules doivent être espacés. L'outil de séquençage du groupe PSA Peugeot Citroën utilise des contraintes d'espace pour répondre à cet objectif. Grâce au respect de ces contraintes d'espace, l'opérateur est censé réaliser ses tâches sans solliciter l'aide d'un opérateur polyvalent.

Aujourd'hui, le choix du critère des contraintes d'espace est de la responsabilité des équilibriers tandis que le calcul du ratio de ces contraintes est de la responsabilité de la coordination de production. Or, les équilibriers connaissent la charge de travail des

opérateurs et les quantités prévisionnelles. Alors que la coordination de production ne peut accéder qu'aux quantités prévisionnelles. Par conséquent, les ratios sont calculés en fonction des volumes et non de la charge de travail. Pour mieux définir les ratios des contraintes d'espacement, nous avons deux possibilités : soit la coordination de production accède à la charge de travail des opérateurs, soit le bureau des méthodes prend en charge le calcul des ratios. Comme le groupe PSA Peugeot Citroën entretient une politique de séparation des métiers, la première possibilité ne peut pas être retenue. Donc, demander aux équilibres de définir simultanément les critères et les ratios des contraintes d'espacement serait un pas vers une amélioration de la qualité de la séquence dans l'atelier montage. La coordination de production jouerait alors le rôle du gendarme en vérifiant que les ratios indiqués par les équilibres sont compatibles avec la flexibilité demandée au montage. De plus, pour améliorer la corrélation entre le respect des contraintes d'espacement et les alertes déclenchées par SPELEO, nous préconisons de limiter la dispersion des temps de traitement autour de deux valeurs seulement (temps inférieur au temps cycle et temps supérieur au temps cycle).

Nous venons de décrire une méthode pour définir les contraintes d'espacement à négocier. Mais, dans le tableau 3.14, nous avons constaté qu'il peut être très difficile de les respecter. Dans le chapitre qui suit, nous allons étudier la possibilité d'anticiper ces difficultés en s'intéressant à un phénomène non abordé jusqu'à présent appelé « interactions de contraintes ».

4. Les interactions de contraintes

Dans le chapitre 3, nous avons décrit une méthode pour définir les contraintes d'espacement. Et, nous avons observé que certaines contraintes d'espacement peuvent être plus difficiles que d'autres à respecter.

Comme nous l'avons abordé dans le deuxième chapitre, la coordination de production pour être certaine de respecter toutes les contraintes d'espacement simultanément a tendance à demander une marge de sécurisation plus élevée que celle préconisée par le groupe. Cette pratique est due à une mauvaise compréhension d'un phénomène nouvellement identifié qui, de surcroît, n'a pas été abordé à notre connaissance dans la littérature : les interactions de contraintes.

Pour commencer, nous allons caractériser ce phénomène à l'aide de trois exemples significatifs. Nous décrirons succinctement les différentes approches que nous avons étudiées au cours de notre étude. Puis, nous aborderons les définitions qui seront utilisées dans la modélisation que nous développerons. Nous comparerons les résultats obtenus avec la modélisation que nous proposons et ceux de l'outil de séquençement du groupe PSA Peugeot Citroën. Pour conclure ce chapitre, nous présenterons un outil d'aide à l'analyse des interactions de contraintes utilisant l'indicateur proposé.

4.1. CARACTERISATION DES INTERACTIONS DE CONTRAINTES

Depuis 1998, les coordinations de production des sites de production du groupe PSA Peugeot Citroën ont identifié deux situations qui perturbent le respect des contraintes d'espacement lors de l'ordonnancement des véhicules pour l'atelier montage : les options exclusives et les options fortement croisées. Les options exclusives concernent des options qui ne peuvent pas être cumulées sur un même véhicule comme la silhouette (3 portes, 5 portes ou Break) ou la motorisation (Essence, HDI ou Diesel). Les options fortement croisées sont des options qui peuvent être commandées indépendamment l'une de l'autre par les clients mais qui sont souvent commandées ensemble comme le chargeur CD et la navigation. En pratique, nous avons remarqué que la coordination de production accordait une plus grande attention aux cas des options fortement croisées et négligeait les options exclusives ou faiblement croisées.

Jusqu'à présent ces deux phénomènes sont traités de manière spécifique. Or, nous montrerons qu'ils sont issus d'un seul phénomène que nous avons appelé « les interactions de contraintes ».

Les figures 4.1, 4.2 et 4.3 mettent en évidence l'influence des interactions de contraintes sur un exemple. Pour ces 3 cas, nous avons considéré que nous disposions de 6 véhicules avec au moins l'option A, 9 véhicules avec au moins l'option B, pour 18 véhicules au total. Les ratios des deux contraintes d'espacement, calculés indépendamment et qui respectent les 18 véhicules, sont $N_A/P_A=1/3$ et $N_B/P_B=1/2$. La différence entre ces 3 cas réside dans le nombre de véhicules ayant les deux options simultanément.

4.1.1. LES OPTIONS EXCLUSIVES

La figure 4.1 illustre le phénomène quand aucun véhicule n'a les deux options simultanément. En fait, il est impossible de trouver une séquence respectant simultanément les deux contraintes. La séquence doit satisfaire le respect de la contrainte A (ligne 1 de la figure 4.1) et la contrainte B (ligne 2 de la figure 4.1). La séquence complète, union des deux sous séquences, est impossible car nous ne possédons pas de véhicules avec les deux options simultanément. Dans la figure 4.1, tout déplacement d'une option « A » va générer un non respect. Si une option « A » est décalée à gauche, le véhicule possédant l'option décalée ne respectera la contrainte. Si elle est décalée à droite, le véhicule suivant soumis à la contrainte ne la respectera pas.

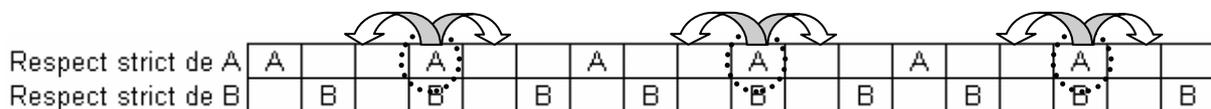


Figure 4.1 : Exemple de séquence mettant en évidence la notion d'interactions de contraintes

Ce phénomène a été observé sur le site de Madrid au cours de l'étude (Lesert, 2003). Le site de production de Madrid compte une ligne d'assemblage fabriquant 3 types de véhicule. L'objectif de cette étude était de trouver des ratios à appliquer à chacun des types de véhicule tels que leur respect assure une consommation régulière et une absence de difficulté au montage. Or, dans un grand nombre de cas, il était impossible de créer une séquence respectant ces ratios.

4.1.2. LES OPTIONS FORTEMENT CROISEES

La figure 4.2 illustre le phénomène quand le taux de véhicules ayant les deux options simultanément parmi l'une des deux options est élevé (cas du chargeur CD et de la navigation). Supposons que nous comptions 5 véhicules avec les options A et B. La séquence

doit satisfaire le respect des deux contraintes. Mais la séquence doit aussi comprendre 5 véhicules ayant simultanément les deux options A et B. Quelque soit l'ordre des véhicules dans la séquence calculée, il n'existe pas de séquence respectant les deux contraintes.

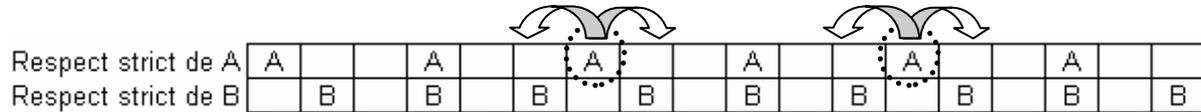


Figure 4.2 : Exemple de séquence mettant en évidence la notion d'interactions de contraintes

Ce phénomène a été observé sur tous les sites de production et a fait l'objet de nombreux outils et méthodes qui ne se sont pas révélés convaincants.

4.1.3. UNE LISTE IDEALE

Dans les deux précédents exemples, nous avons présenté des situations faisant l'objet d'études diverses par les sites de production. Dans cet exemple, nous allons considérer une situation intermédiaire (Figure 4.3). Cette situation passe inaperçue car elle ne déclenche aucun non respect de contraintes d'espacement lors de l'engagement des véhicules sur la ligne d'assemblage.

Pour cet exemple, nous comptons 3 véhicules avec les options A et B simultanément. Comme la figure 4.3 le montre, il existe une séquence qui respecte simultanément les deux contraintes d'espacement.

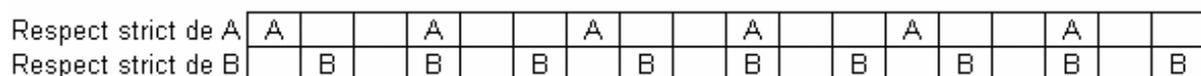


Figure 4.3 : Exemple de séquence mettant en évidence la notion d'interactions de contraintes

Cette liste est appelée « idéale » car cette séquence est très facile à construire et surtout elle ne compte aucun non respect.

4.1.4. SYNTHESE

Ces trois exemples montrent que le respect du volume de chaque contrainte d'espacement ne suffit pas à garantir le respect de l'ensemble des contraintes d'espacement dans l'ordonnancement. De plus, le respect de l'ensemble des contraintes d'espacement dans l'ordonnancement est conditionné par le nombre de véhicules ayant des options multiples.

Nous avons nommé ce phénomène « les interactions de contraintes » et nous l'avons défini comme suit :

Définition. Les interactions de contraintes sont l'ensemble des perturbations créées par la prise en compte simultanée de toutes les contraintes d'espacement pour la création d'une séquence de véhicules (Lesert et al, 2005).

Dans ce chapitre, nous allons étudier ce phénomène et proposer une modélisation adaptée à une application industrielle.

4.2. ETAT DE L'ART

La difficulté à respecter un ratio consiste à mesurer l'écart entre le volume induit par le ratio et le volume à produire (Comby, 1996). Mais, les approches de la littérature considérant plusieurs contraintes d'espacement se bornent essentiellement à identifier l'existence de solutions faisables comme dans Gent (1998). Elles ne permettent pas d'obtenir un niveau de difficulté concernant le respect simultané de deux contraintes d'espacement ou plus.

Dans cette partie, nous allons présenter l'indicateur de difficulté à respecter une contrainte d'espacement proposé par Comby. Puis, nous décrirons succinctement les différentes approches que nous avons explorées au cours de nos travaux pour mesurer la difficulté à respecter deux contraintes d'espacement simultanément.

4.2.1. L'INDICATEUR DE DIFFICULTE A RESPECTER UN RATIO

La difficulté à respecter une contrainte d'espacement peut être évaluée grâce à l'indicateur de difficulté à respecter un ratio proposé par Comby (1996), I_r . Il correspond à l'écart entre le volume induit par le ratio, $\frac{N}{P} * Q_{tot}$, et le nombre de véhicules à produire, Q .

$$I_r = \frac{\frac{N}{P} * Q_{tot} - Q}{\frac{N}{P} * Q_{tot}} \Leftrightarrow I_r = \frac{P}{N} \left(\frac{N}{P} - \frac{Q}{Q_{tot}} \right) \quad (4.1)$$

Par exemple, si $I_r = 0,1$, l'écart entre le volume induit par le ratio et le nombre de véhicules à produire correspond à 10% du volume induit par le ratio.

Grâce à sa valeur, il est possible d'anticiper le respect des contraintes d'espacement. Lorsque la valeur de cet indicateur est négative, nous ne pourrions pas respecter la contrainte d'espacement. Lorsqu'elle est positive et proche de 0, la contrainte d'espacement devrait être difficile à respecter. Et, lorsqu'elle est proche de 1, la contrainte d'espacement devrait être très facile à respecter.

L'indicateur de difficulté à respecter un ratio est utilisé par Baratou (1998) pour vérifier la cohérence des ratios utilisés dans le problème de séquençage des véhicules d'une ligne de montage d'une usine terminale automobile. Il s'assure de la compatibilité du volume d'une option avec la contrainte d'espacement en vérifiant que cet indicateur est positif ou nul pour chacune des contraintes d'espacement définies. Depuis peu, le groupe PSA Peugeot Citroën utilise cet indicateur pour prioriser les contraintes d'espacement les unes par rapport aux autres dans le cadre de la création de la LUO.

Néanmoins, cet indicateur est insuffisant pour identifier les risques de non respects. Les contraintes d'espacement utilisées dans les 3 exemples présentés dans la partie 4.1. ont un indicateur de difficulté à respecter un ratio nul car le volume correspond exactement au ratio à appliquer (9/18 pour 1/2 et 6/18 pour 1/3). Avec cette valeur, les ratios des contraintes d'espacement s'annoncent difficiles à respecter. Pourtant, les trois exemples ne présentent pas du tout la même difficulté. Comme nous le présenterons dans la suite de ce chapitre, ce phénomène n'est pas limité à ces cas particuliers car il se rencontre aussi dans le cas où $I_r > 0$.

4.2.2. L'INDICATEUR DE DIFFICULTE A RESPECTER DEUX RATIOS

Les différentes approches que nous avons suivies ont pour objectif d'évaluer approximativement le nombre de non respects des ratios des contraintes d'espacement (équation 3.14). Nos approches se sont limitées à l'étude de deux contraintes d'espacement. A notre connaissance, ce sujet n'a jamais été abordé dans la littérature.

Cette étude a débuté par la construction d'un abaque (Vienot, 2004). Le nombre de simulations à réaliser pour construire cet abaque était trop important. Néanmoins, nous avons relevé des régularités qui nous ont permis, sous des hypothèses très restrictives, de définir un premier modèle mathématique (Lesert et al., 2005). Puis, un modèle mathématique, présenté en Annexe B, a été obtenu en levant progressivement certaines de ces hypothèses. Malheureusement, nous n'avons pas réussi à obtenir un modèle mathématique suffisamment général pour être appliqué dans un cadre industriel. Enfin, nous avons généralisé ce modèle à l'aide de l'algorithme « PPLI » (au plus proche de la liste idéale). L'algorithme PPLI, décrit dans l'article (Lesert et al., 2006), fait l'objet de ce chapitre.

4.3. DEFINITIONS

Avant de décrire l'indicateur de difficulté à respecter deux ratios correspondant à une estimation du nombre de non respects, nous allons définir les termes que nous allons utiliser par la suite.

4.3.1. UN PROGRAMME DE PRODUCTION

Les algorithmes et les modèles, présentés dans ce chapitre, se limitent à un cas simple à deux contraintes d'espacement, ayant la même importance, dont le programme de production est présenté dans tableau 4.1. Nous considérons un programme de production pour des véhicules pouvant posséder deux options (A et B). Cela conduit à quatre types de véhicules différents (Type \emptyset , Type A, Type B et Type AB) dont les quantités correspondent respectivement à q_0 , q_A , q_B et q_{AB} . La quantité totale, $Q_{tot} = q_0 + q_A + q_B + q_{AB}$, correspond au nombre de véhicules pris en compte dans le programme de production.

	A	B	Quantité
Type \emptyset	0	0	q_0
Type A	1	0	q_A
Type B	0	1	q_B
Type AB	1	1	q_{AB}
	$Q_A = q_A + q_{AB}$	$Q_B = q_B + q_{AB}$	Q_{tot}

Tableau 4.1 : Un programme de production

Nous définissons pour les options A et B, les contraintes d'espacement avec les ratios N_A/P_A et N_B/P_B tel que $1 \leq N_A < P_A$, $1 \leq N_B < P_B$, $(N_A, P_A) \in \mathbb{N}^2$ et $(N_B, P_B) \in \mathbb{N}^2$. Nous supposons que les véhicules qui précèdent ou qui succèdent la liste ne possèdent aucune option. Nous supposons également que Q_A et Q_B sont non nuls.

Et, nous noterons, $P(q_0, q_A, q_B, q_{AB}, N_A/P_A, N_B/P_B)$, le programme de production avec deux contraintes d'espacement.

4.3.2. NOMBRE DE NON RESPECTS D'UNE CONTRAINTE D'ESPACEMENT

Pour les véhicules soumis à la contrainte d'espacement avec le ratio N/P , nous comptabiliserons un non respect pour un véhicule ayant l'option concernée quand le nombre des véhicules ayant cette option sur les P derniers véhicules excède N .

Pour une séquence de véhicules donnée, l'indicateur d'espacement, I_{esp_j} , compte le nombre de non respects pour la contrainte d'espacement j (équation 3.13). Pour évaluer une séquence de véhicules donnée, nous utiliserons la formule (équation 3.14) avec $c=2$ et $\omega_i=1$ (*i.e.* pas de différenciation entre les contraintes d'espacement). Par conséquent, I_{esp} se réduit à dénombrer le nombre de non respects pour les deux contraintes d'espacement.

Dans ce chapitre, nous nous proposons de borner *a priori* la valeur de cet indicateur.

4.3.3. MOTIF ET ENSEMBLE DES MOTIFS D'UN RATIO

Définition. Un motif, $m_{N/P}$, pour le ratio N/P , représente une suite de P valeurs « 0 » ou « 1 », $(v_i)_{i \in 1..P}$.

La valeur « 0 » correspond au cas où un véhicule n'a pas l'option soumise à la contrainte d'espacement et « 1 » au cas où un véhicule a l'option soumise à la contrainte d'espacement. Le nombre de valeur « 1 » dans un motif est toujours égal à N ($\sum_i v_i = N$).

$$m_{N/P} = (v_i)_{i \in 1..P} \quad (4.2)$$

$$\text{Avec } v_i = \{0,1\} \text{ tel que } \sum_i v_i = N$$

Nous noterons, $M_{N/P}$, l'ensemble des motifs pour le ratio N/P .

La figure 4.4 illustre l'ensemble des motifs $M_{2/4}$ du ratio 2/4. Chaque ligne représente un motif.

1	1	0	0
1	0	1	0
1	0	0	1
0	1	1	0
0	1	0	1
0	0	1	1

Figure 4.4 : Ensemble des motifs possibles pour un ratio 2/4

La cardinalité de l'ensemble des motifs, $M_{N/P}$, correspond au nombre de combinaisons possibles de N véhicules ayant une option parmi P véhicules. Elle s'obtient de la façon suivante :

$$\text{Card}(M_{N/P}) = C_P^N = \frac{P!}{N!(P-N)!} \quad (4.3)$$

4.3.4. **RATIO COMPATIBLE ET ENSEMBLE DES RATIOS COMPATIBLES D'UNE CONTRAINTE D'ESPACEMENT**

Définition. Un ratio N'/P' est compatible avec un ratio N/P si tous les motifs du ratio N'/P' répétés à l'infini respectent le ratio N/P .

Propriété. Un ratio N'/P' est compatible avec un ratio N/P si la condition de compatibilité, donnée par l'équation 4.4, est respectée.

$$\left\lfloor \frac{P}{P'} \right\rfloor * N' + \min \left(P - P' * \left\lfloor \frac{P}{P'} \right\rfloor, N' \right) \leq N \quad (4.4)$$

La figure 4.5 illustre cette définition. Pour une contrainte d'espace appliquée aux moteurs HDI, le ratio 1/2 est compatible avec le ratio 2/4 car les deux motifs possibles avec le ratio 1/2 répété à l'infini respectent 2/4. Par contre, le ratio 2/4 n'est pas compatible avec le ratio 1/2, tout comme le ratio 1/3 n'est pas compatible avec le ratio 1/4 car il existe au moins un motif répété à l'infini qui ne respecte pas le ratio 1/4.



Figure 4.5 : Exemple de ratios compatibles et non compatibles

Démonstration.

La démonstration de cette condition de compatibilité repose sur le fait qu'il faut qu'un motif de P véhicules, composé de motifs de P' véhicules contenant N' véhicules avec l'option, n'excède pas N véhicules avec l'option.

Un motif de P véhicules est composé de $\left\lfloor \frac{P}{P'} \right\rfloor$ motifs entiers de P' véhicules et d'un motif incomplet de longueur $P - P' * \left\lfloor \frac{P}{P'} \right\rfloor$. Dans les $\left\lfloor \frac{P}{P'} \right\rfloor$ motifs entiers, nous pouvons placer au plus $\left\lfloor \frac{P}{P'} \right\rfloor * N'$ véhicules avec l'option. Dans le motif incomplet, nous pouvons placer au plus $\min \left(P - P' * \left\lfloor \frac{P}{P'} \right\rfloor, N' \right)$ véhicules avec l'option. Par conséquent, un motif de P véhicules,

composé de motifs de P' véhicules contenant N' véhicules avec l'option, n'excède pas N véhicules avec l'option si la condition de compatibilité, $\left\lfloor \frac{P}{P'} \right\rfloor * N' + \min\left(P - P' * \left\lfloor \frac{P}{P'} \right\rfloor, N'\right) \leq N$, est respectée.

Notons que si $P' > P$, la condition de compatibilité devient $N' \leq N$.

En effet, comme $P' > P$, $\left\lfloor \frac{P}{P'} \right\rfloor = 0$ et donc :

$$\left\lfloor \frac{P}{P'} \right\rfloor * N' + \min\left(P - P' * \left\lfloor \frac{P}{P'} \right\rfloor, N'\right) \leq N$$

$$\Leftrightarrow 0 * N' + \min(P - P' * 0, N') \leq N$$

$$\Leftrightarrow \min(P, N') \leq N$$

Comme, par définition, $N < P$, P ne peut pas être plus petit que N . Donc, $\min(P, N') \leq N$ est équivalent à $N' \leq N$.

Exemple : Le ratio $2/7$ est-il compatible avec le ratio $5/17$?

Un motif de 17 véhicules est composé de $\left\lfloor \frac{17}{7} \right\rfloor = 2$ motifs entiers de 7 véhicules et d'un motif incomplet de longueur $17 - 7 * 2 = 3$. Dans les 2 motifs entiers, nous pouvons placer au plus $2 * 2 = 4$ véhicules avec l'option. Dans le motif incomplet, nous pouvons placer au plus $\min(3, 2) = 2$ véhicules avec l'option. Par conséquent, dans un motif de 17 véhicules, nous pouvons placer $4 + 2 = 6$ véhicules avec l'option. Donc, le ratio $2/7$ n'est pas compatible avec le ratio $5/17$ car 6 n'est pas inférieur à 5.

En appliquant la condition de compatibilité, nous pouvons constater que les deux ratios ne sont pas compatibles comme le montre le développement suivant :

$$\left\lfloor \frac{17}{7} \right\rfloor * 2 + \min\left(17 - 7 * \left\lfloor \frac{17}{7} \right\rfloor, 2\right) \leq 5 \Leftrightarrow 2 * 2 + \min(17 - 7 * 2, 2) \leq 5 \Leftrightarrow 4 + \min(3, 2) \leq 5 \Leftrightarrow 6 \leq 5 \text{ (faux)}$$

Définition. Pour une contrainte d'espacement j avec un ratio N_j/P_j , l'ensemble des ratios compatibles de cette contrainte d'espacement, $R_{C_{N_j/P_j}}$, correspond à l'ensemble des ratios N'_j/P'_j compatible avec le ratio N_j/P_j (équation 4.5).

$$Rc_{N_j/P_j} = \left\{ N'_j/P'_j \left| N'_j * \left\lfloor \frac{P_j}{P'_j} \right\rfloor + \min \left(P_j - P'_j * \left\lfloor \frac{P_j}{P'_j} \right\rfloor, N'_j \right) \leq N_j, \forall (N'_j, P'_j) \in \mathbb{N}^2, 0 < N'_j < P'_j \right. \right\} \quad (4.5)$$

Propriété. L'ensemble des ratios compatibles (ensemble 4.5) est un ensemble infini.

Nous noterons qu'il n'est pas intéressant de remplacer le ratio N_j/P_j par tous les ratios issus de cet ensemble. La raison principal réside dans le fait que le nombre de véhicules induits par le ratio N_j/P_j est soit trop petit ou trop grand et non réaliste avec le respect d'un programme de production réel. Aussi, pour limiter l'exploration de cet ensemble, nous introduisons la condition d'applicabilité que nous allons décrire ci-dessous.

Nous rappelons aussi que cet ensemble est utilisé lors de la sélection d'un ratio pour une contrainte d'espacement contraignant plusieurs postes de travail (Cf. 3.3.3, équation 3.11). L'ensemble décrit par l'équation 3.11 est aussi un ensemble infini mais il est borné à l'aide de l'équation 3.12.

4.3.5. RATIO COMPATIBLE APPLICABLE ET ENSEMBLE DES RATIOS COMPATIBLES APPLICABLES D'UNE CONTRAINTE D'ESPACEMENT

Définition. Un ratio N'_j/P'_j compatible avec un ratio N_j/P_j est applicable pour une contrainte d'espacement j si le volume induit par le ratio N'_j/P'_j , $\left\lfloor \frac{N'_j}{P'_j} * Q_{tot} \right\rfloor$, permet de réaliser le volume présent dans le programme de production de l'option soumise à la contrainte d'espacement, Q_j .

Définition. L'ensemble des ratios compatibles applicables, R_{N_j/P_j} , du ratio N_j/P_j de la contrainte d'espacement j (équation 4.7) correspond à l'ensemble des ratios compatibles, Rc_{N_j/P_j} , qui respecte la condition d'applicabilité (équation 4.6).

$$Q_j \leq \left\lfloor \frac{N'_j}{P'_j} * Q_{tot} \right\rfloor \quad (4.6)$$

$$R_{N_j/P_j} = \left\{ N'_j/P'_j \in Rc_{N_j/P_j} \left| Q_j \leq \left\lfloor \frac{N'_j}{P'_j} * Q_{tot} \right\rfloor \right. \right\} \quad (4.7)$$

L'ensemble des ratios compatibles applicables de la contrainte d'espacement j est construit en parcourant l'ensemble des valeurs de N'_j compris entre N_j et 1. Pour chacune de ces valeurs, nous sélectionnons l'ensemble des valeurs de $P'_j > N'_j$ qui respectent les conditions de compatibilité (équation 4.4) et d'applicabilité (équation 4.6).

Exemple :

L'ensemble des ratios compatibles applicables d'une contrainte d'espacement avec le ratio $4/7$ et un volume de 145 véhicules ayant l'option dans le programme de production pour un total de 300 véhicules est $\{1/2, 2/4, 3/6, 4/7, 4/8\}$.

Le tableau 4.2 illustre le procédé utilisé pour construire cet ensemble. Les lignes du tableau représentent les différentes valeurs de N'_j allant de 4 à 1. Les colonnes représentent les différentes valeurs de P'_j . Les valeurs indiquées dans les cellules du tableau, ayant un ratio N'_j/P'_j respectant la condition de compatibilité, représentent le volume induit par le ratio N'_j/P'_j . Une cellule grisée représente un ratio compatible respectant la condition d'applicabilité.

N'_j/P'_j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	...
4							171	150	133	...
3						150	128	112	100	...
2				150	120	100	85	75	66	...
1		150	100	75	60	50	42	37	33	...

Tableau 4.2 : Exemple de ratios compatibles applicables

4.3.6. ENSEMBLE DES MOTIFS D'UNE CONTRAINTE D'ESPACEMENT

Définition. L'ensemble des motifs de la contrainte d'espacement j , avec le ratio N_j/P_j est dénoté par \mathcal{M}_{N_j/P_j} et est obtenu par l'équation 4.8.

$$\mathcal{M}_{N_j/P_j} = \bigcup_{N'_j/P'_j \in R_{N_j/P_j}} M_{N'_j/P'_j} \quad (4.8)$$

Exemple :

L'ensemble des ratios compatibles applicables de la contrainte d'espacement $3/6$ est $\{3/6, 1/2\}$, en supposant un volume de 300 véhicules ayant l'option parmi les 600 véhicules à produire. L'ensemble des motifs, $\mathcal{M}_{3/6}$, est illustré par la figure 4.6.

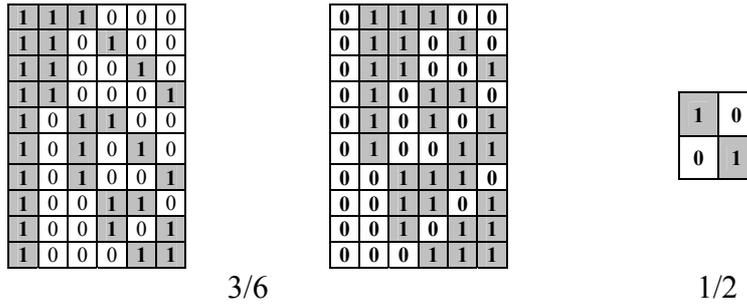


Figure 4.6 : Exemple d'ensemble des motifs d'une contrainte de ratio 3/6

La cardinalité de l'ensemble des motifs d'une contrainte d'espacement, \mathcal{M}_{N_j/P_j} , s'obtient de la façon suivante :

$$\text{Card}(\mathcal{M}_{N_j/P_j}) = \sum_{N'_j/P'_j \in R_{N_j/P_j}} \text{Card}(M_{N'_j/P'_j}) \quad (4.9)$$

4.3.7. MOTIF ELEMENTAIRE, LISTE IDEALE ET ENSEMBLE DES LISTES IDEALES

Soit $m_{N_A/P_A} \in \mathcal{M}_A$ et $m_{N_B/P_B} \in \mathcal{M}_B$, deux motifs appartenant à l'ensemble des motifs de la contrainte d'espacement A et à l'ensemble des motifs de la contrainte d'espacement B.

Définition. Un motif élémentaire est une séquence de longueur $L_{\text{motif}} = \text{PPCM}(P_A, P_B)$ correspondant à la superposition de la répétition de ces deux motifs.

La figure 4.7 présente un motif élémentaire obtenu en choisissant le motif $m_{2/5}$ (1,0,1,0,0) pour la contrainte d'espacement A et le motif $m_{2/4}$ (1,1,0,0) pour la contrainte d'espacement B.

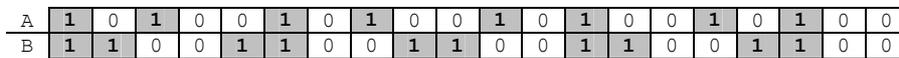


Figure 4.7 : Exemple d'un motif élémentaire

Définition. Une liste idéale, l , est la répétition d'un motif élémentaire pour une séquence de longueur Q_{tot} .

Nous noterons $l = \sigma(m_{N_A/P_A}, m_{N_B/P_B})$ la construction d'une liste idéale. Selon les motifs choisis, une liste idéale correspond à un programme de production idéal, $P_{idéal}(l)$, que nous pouvons évaluer comme suit :

$$P_{idéal}(q_{liste_0}(l), q_{liste_A}(l), q_{liste_B}(l), q_{liste_{AB}}(l), N_A/P_A, N_B/P_B) \quad (4.10)$$

avec $q_{liste_0}(l)$, nombre de véhicules sans option dans la liste idéale l
 $q_{liste_A}(l)$, nombre de véhicules ayant l'option A seule dans la liste idéale l
 $q_{liste_B}(l)$, nombre de véhicules ayant l'option B seule dans la liste idéale l
 $q_{liste_{AB}}(l)$, nombre de véhicules ayant les deux options dans la liste idéale l

La figure 4.8 représente une répétition du motif élémentaire de la figure 4.7 dans une liste de 33 véhicules. Le programme de production de cette liste idéale est $P_{idéal}(9, 7, 10, 7, 2/5, 2/4)$, soit 9 véhicules sans option, 7 avec l'option A seule, 10 avec l'option B seule et 7 avec les options A et B simultanément.

A	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1
B	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1

Figure 4.8 : Exemple d'une liste idéale

Définition. L'ensemble des listes idéales, L , correspond à l'ensemble des listes idéales construites à partir du produit cartésien des ensembles des motifs des deux contraintes de ratio.

$$L = \left\{ \sigma(m_{N_A/P_A}, m_{N_B/P_B}) \mid \forall m_{N_A/P_A} \in \mathcal{M}_A, \forall m_{N_B/P_B} \in \mathcal{M}_B \right\} \quad (4.11)$$

La cardinalité de l'ensemble des listes idéales, L , est évaluée de la façon suivante :

$$\text{Card}(L) = \text{Card}(\mathcal{M}_A) * \text{Card}(\mathcal{M}_B) \quad (4.12)$$

Si un programme de production réel est équivalent à un programme de production idéal, alors nous avons une liste sans non respect. Par contre, si un programme de production réel ne correspond à aucun programme de production idéal de L , nous allons commencer par une liste idéale qui ne correspond pas au programme de production réel, puis nous allons trouver une solution réalisable en procédant à des perturbations de la liste idéale pour obtenir

une liste correspondant au programme de production et si possible ayant le moins de non respect.

Dans la partie suivante, nous allons décrire l'algorithme PPLI (au Plus Proche de la Liste Idéale) utilisé pour évaluer l'indicateur de difficulté à respecter deux ratios.

4.4. MODELISATION DES INTERACTIONS DE CONTRAINTES

Avant de procéder à la description de l'algorithme PPLI, nous allons énoncer trois propriétés et une conjecture. Sous certaines conditions particulières, ces propriétés nous permettent de vérifier rapidement l'existence d'une séquence sans non respect des contraintes d'espacement.

4.4.1. PROPRIETES

Pour les contraintes d'espacement de la forme $1/P_A$ et $1/P_B$, *i.e.* $N_A=1$ et $N_B=1$, nous allons énoncer 3 propriétés, démontrées en annexe C, caractérisant l'absence de violations dans la séquence à construire. Les deux premières ont déjà été démontrées par (Lesert et al, 2005) pour le cas où le nombre de véhicules à séquencer est multiple de la longueur d'un motif élémentaire. Les démonstrations reposent sur le fait qu'un motif élémentaire compte au plus un véhicule ayant les deux options simultanément (Annexe D).

$$\text{Sous les hypothèses } P_A \leq \left\lfloor \frac{Q_{tot}}{Q_A} \right\rfloor \text{ et } P_B \leq \left\lfloor \frac{Q_{tot}}{Q_B} \right\rfloor$$

Propriété 1. Dans le cas où P_A et P_B sont multiples, il existe un séquençement respectant simultanément les deux contraintes de ratio $1/P_A$ et $1/P_B$.

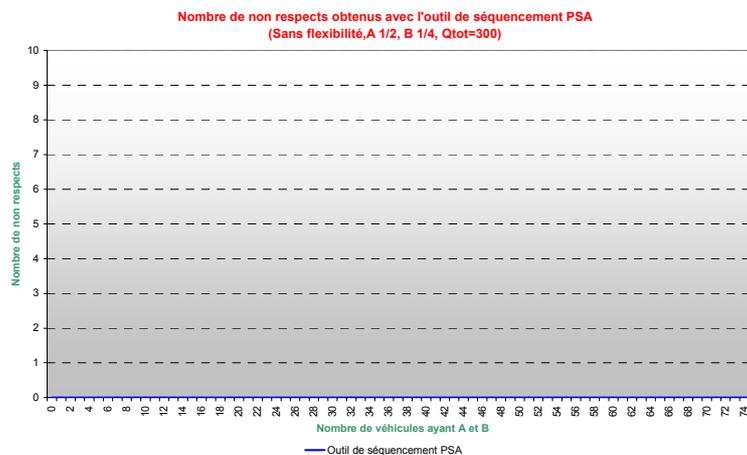


Figure 4.9 : Propriété 1 : A 1/2, B 1/4, $Q_{tot} = 300$, $Q_A = 150$, $Q_B = 75$, $I_{r_A} = 0$, $I_{r_B} = 0$

Propriété 2. Dans le cas où P_A et P_B sont premiers entre eux, si $q_{AB} = Q_{ind}^-$ ou $q_{AB} = Q_{ind}^+$, alors il existe un séquençement respectant simultanément les deux contraintes de ratio

$$1/P_A \text{ et } 1/P_B, \text{ avec } Q_{ind}^- = \left\lfloor \frac{Q_{tot}}{L_{motif}} \right\rfloor \text{ et } Q_{ind}^+ = \left\lceil \frac{Q_{tot}}{L_{motif}} \right\rceil.$$

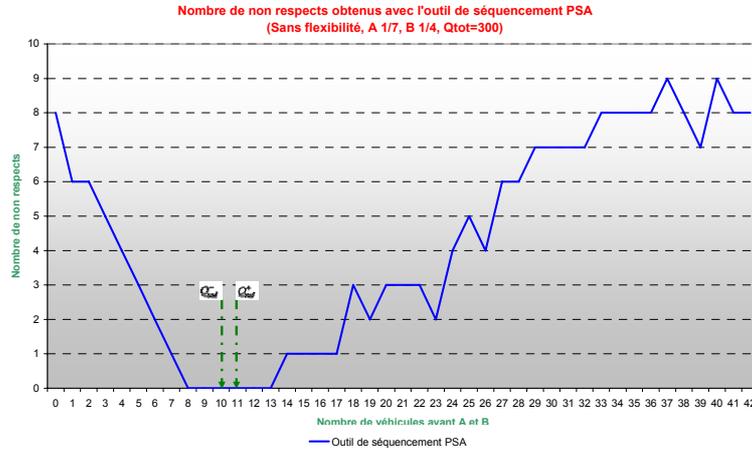


Figure 4.10 : Propriété 2 : A 1/7, B 1/4, $Q_{tot} = 300$, $Q_A = 42$, $Q_B = 75$, $I_{r_A} = 0,02$, $I_{r_B} = 0$

Propriété 3. Dans le cas où P_A et P_B ne sont ni premiers entre eux, ni multiples, si $q_{AB} \leq Q_{ind}^+$, alors il existe un séquençement respectant simultanément les deux contraintes de ratio $1/P_A$ et $1/P_B$.

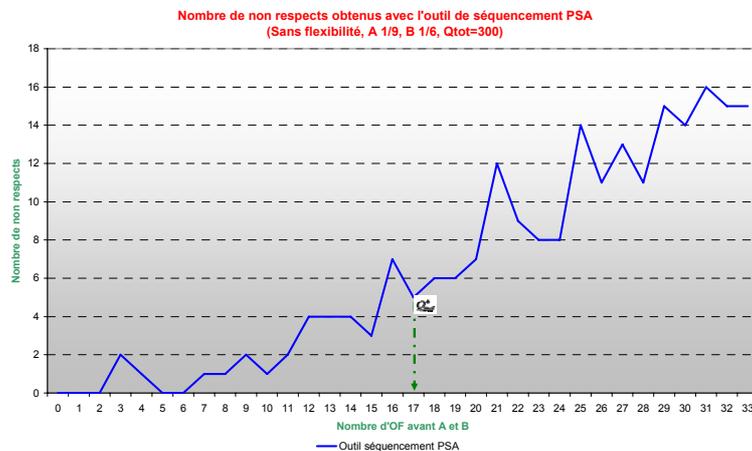


Figure 4.11 : Propriété 3 : A 1/6, B 1/9, $Q_{tot} = 300$, $Q_A = 50$, $Q_B = 33$, $I_{r_A} = 0$, $I_{r_B} = 0,01$

Pour faire les figures 4.9, 4.10 et 4.11 illustrant les 3 propriétés, nous avons fixé les données suivantes : Q_{tot} , Q_A , Q_B , N_A/P_A et N_B/P_B . En abscisse, nous faisons varier le nombre de véhicules soumis aux deux contraintes simultanément (q_{AB} varie de 0 à la quantité de véhicules possédant l'option la moins représentée, $\min(Q_A, Q_B)$). En ordonnée, nous avons le nombre de non respects obtenu avec l'outil de séquençement actuellement utilisé par le

groupe PSA Peugeot Citroën. La figure 4.9 illustrant la propriété 1 montre l'absence de non respects quelque soit le nombre de véhicules ayant simultanément les deux options. La figure 4.10 montre que l'outil de séquençement a trouvé une séquence sans non respects entre

$$Q_{ind}^- = \left\lfloor \frac{Q_{tot}}{L_{motif}} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{300}{PPCM(4,7)} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{300}{28} \right\rfloor = 10 \quad \text{et} \quad Q_{ind}^+ = \left\lceil \frac{Q_{tot}}{L_{motif}} \right\rceil = \left\lceil \frac{300}{PPCM(4,7)} \right\rceil = \left\lceil \frac{300}{28} \right\rceil = 11.$$

Et, enfin, la figure 4.11 montre les limites de l'outil de séquençement utilisé. L'outil de séquençement n'a pas trouvé de solution sans non respect entre 0 et $Q_{ind}^+ = \left\lceil \frac{Q_{tot}}{L_{motif}} \right\rceil = \left\lceil \frac{300}{PPCM(6,9)} \right\rceil = \left\lceil \frac{300}{18} \right\rceil = 17$. Or,

nous démontrons en annexe qu'il est possible de créer une séquence sans non respect. Donc, pour un programme de production donné, P , et deux ratios N_A/P_A et N_B/P_B , si les conditions exprimées dans une de ces propriétés sont satisfaites, alors nous savons qu'il est possible de construire une séquence de véhicules sans non respect. Par conséquent, I_{esp} est estimé à 0.

En pratique, ces propriétés ont changé la perception du phénomène par la coordination de production. Comme nous l'avons déjà souligné dans la première partie de ce chapitre, les options fortement croisées et les options fortement exclusives font l'objet de traitement spécifique, la coordination de production s'attachant davantage au cas des options fortement croisées. Or, ces propriétés montrent que les deux cas sont liés et nécessitent une attention équivalente.

4.4.2. CONJECTURE

En pratique, 90% des contraintes d'espacement négociées ont un ratio de la forme $1/P$. Par conséquent, le plus grand nombre de cas sont couverts par les trois propriétés précédentes. Pour les 10% des contraintes d'espacement de la forme N/P avec $N > 1$, nous présentons la conjecture suivante et le corollaire qui donnent les conditions d'une séquence de véhicules sans non respect. Sous les conditions des propriétés 1 à 3, nous avons vérifié la conjecture ci-dessous en annexe E.

Soit N_A/P_A et N_B/P_B , deux ratios où $N_A > 1$ et/ou $N_B > 1$

Soit $Q^- = \min_{l \in L} (q_{liste_{AB}}(l))$ le nombre minimal de véhicules ayant les options A et B simultanément dans l'ensemble des listes idéales, L .

Soit $Q^+ = \max_{l \in L} (q_{liste_{AB}}(l))$ le nombre maximal de véhicules ayant les options A et B simultanément dans l'ensemble des listes idéales, L .

Conjecture. Il existe une séquence respectant les deux contraintes dans le cas où

$$Q^- \leq q_{AB} \leq Q^+, \quad \frac{Q_A}{Q_{tot}} \leq \frac{N_A}{P_A} \quad \text{et} \quad \frac{Q_B}{Q_{tot}} \leq \frac{N_B}{P_B}$$

Corollaire. Si P_A et P_B sont multiples, il existe un séquençement respectant simultanément

$$\text{les deux contraintes, dans le cas où } \frac{Q_A}{Q_{tot}} \leq \frac{N_A}{P_A} \quad \text{et} \quad \frac{Q_B}{Q_{tot}} \leq \frac{N_B}{P_B}.$$

Nous n'avons pas obtenu une preuve formelle de cette conjecture. Cependant, nous l'avons testé sur de très nombreux jeux de données réels. L'outil de séquençement du groupe PSA Peugeot Citroën a été capable de trouver une séquence avec 0 non respect (ou proche de 0) lorsque le nombre de véhicules ayant les deux options était compris entre Q^- et Q^+ .

Si le programme de production et les ratios répondent à une des propriétés ou à la conjecture décrites ci-dessus, nous pouvons conclure qu'il est possible de créer une séquence de véhicules qui aura un nombre de non respects égal à 0. Pour les autres cas, nous proposons l'algorithme suivant pour approximer rapidement le nombre de non respects.

4.4.3. AU PLUS PROCHE D'UNE LISTE IDEALE (PPLI)

Dans la description de cette méthode, nous nommerons « flexibilité disponible », l'écart entre le volume des options du programme de production à atteindre et le volume induit par le ratio de la contrainte d'espacement.

La méthode PPME (« au plus proche du motif élémentaire ») dans (Lesert et al, 2005) était réservée aux contraintes d'espacement de type 1/P et aux programmes de production sans flexibilité disponible. L'algorithme PPLI de (Lesert et al, 2006) étend cette méthode aux contraintes d'espacement de type N/P et aux programmes de production ayant de la flexibilité disponible. Cette approche nous a permis d'aboutir à la définition d'un outil d'aide à l'analyse des interactions de contraintes que nous décrirons dans la partie 4.6.

Cet algorithme approxime rapidement le nombre de non respects du programme de production $P(q_0, q_A, q_B, q_{AB}, N_A/P_A, N_B/P_B)$ que nous pourrions obtenir avec l'outil de séquençement du groupe PSA Peugeot Citroën. Cet algorithme construit une séquence en procédant, par étape, à des modifications d'une liste idéale dont le but est de minimiser le nombre de non respects d'une des deux contraintes d'espacement (figure 4.12).

Il se décompose en 4 étapes principales :

- Ecarter les quantités excédentaires pour disposer d'un programme de production ayant les quantités respectant les ratios des contraintes d'espace,
- Exploiter la flexibilité disponible pour explorer les ratios compatibles applicables,
- Construire une séquence évaluant le risque des non respects à partir d'une liste idéale,
- Réintégrer dans la liste idéale modifiée les quantités écartées lors de la première étape.

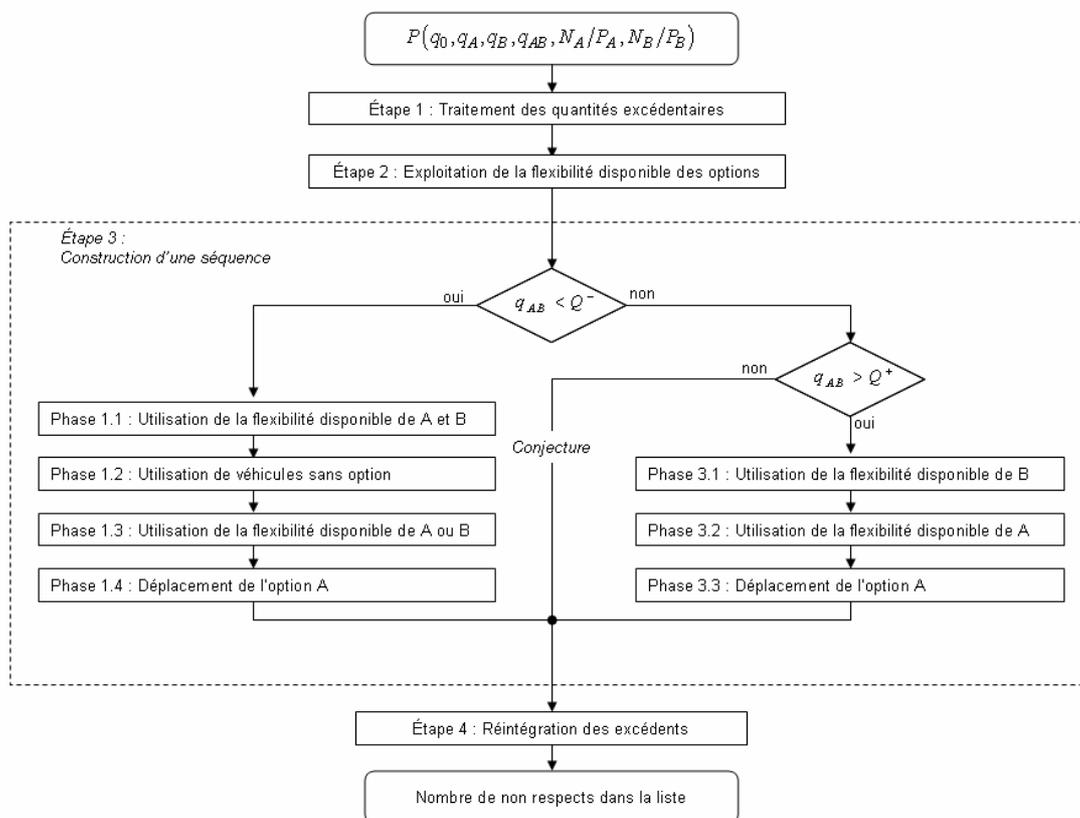


Figure 4.12 : Algorithme PPLI

4.4.3.1. ÉTAPE 1 : TRAITEMENT DES QUANTITES EXCEDENTAIRES

Cette étape intervient occasionnellement car, dans le deuxième chapitre, nous avons montré que la flexibilité demandée au montage permettait d'absorber 94% des variations quotidiennes et commerciales. Cela signifie que le volume induit par le ratio de la contrainte d'espace permet de produire la quantité de véhicules prévue dans 94% des cas.

Le principe de ce traitement consiste à remplacer dans le programme de production les véhicules ayant des options par des véhicules sans option. Ces remplacements sont réalisés tel que le volume des options n'excède pas le volume induit par le ratio négocié. Puis, nous appliquons les deux étapes suivantes sur ce nouveau programme. Les véhicules écartés sont ensuite réintroduits dans la liste obtenue en remplaçant des véhicules sans option par les véhicules écartés dans la quatrième étape.

Cette première étape est détaillée dans l'annexe F.

4.4.3.2. ETAPE 2 : EXPLOITATION DE LA FLEXIBILITE DISPONIBLE

La flexibilité introduite lors de la négociation et les variations commerciales permet d'utiliser pour le séquençement l'ensemble des ratios compatibles applicables. L'utilisation d'un ratio compatible applicable différent du ratio négocié pour une contrainte d'espacement affine l'évaluation du risque de non respects.

Par exemple, soit une contrainte d'espacement négociée à $1/4$ pour A et à $1/7$ pour B, la flexibilité pour B peut permettre de définir une contrainte d'espacement avec un ratio de $1/8$. L'utilisation des ratios $1/4$ et $1/8$ permet de conclure qu'il n'existe pas de risque de non respect car la propriété 1 précise que si $1/P_A$ et $1/P_B$ sont multiples, il existe un séquençement respectant simultanément les deux contraintes.

Pour minimiser la création ou la suppression du nombre de véhicules ayant les deux options simultanément, nous allons appliquer l'étape suivante sur une partie de l'ensemble des listes idéales, L . Ce sous ensemble, L' , correspond aux listes idéales telles que le nombre de véhicules ayant les deux options simultanément, $q_{liste_{AB}}(l)$, soit le plus proche du nombre de véhicules ayant les deux options simultanément, q_{AB} , dans le programme de production, P (équation 4.13).

$$L' = \left\{ l \in L \mid \left| q_{liste_{AB}}(l) - q_{AB} \right| = \min_{l' \in L} \left| q_{liste_{AB}}(l') - q_{AB} \right| \right\} \quad (4.13)$$

Pour chaque liste idéale, l , de L' , nous construirons, à l'étape suivante, une séquence évaluant le risque de non respects, l' . La liste retenue sera celle minimisant le nombre de non respects.

4.4.3.3. ÉTAPE 3 : CONSTRUCTION D'UNE SEQUENCE

Cette étape minimise le nombre de modifications dans une liste idéale pour atteindre le nombre de véhicules ayant les options A et B simultanément, q_{AB} , décrit dans le programme de production, P . Pour cela, nous avons décomposé cette étape en trois sous problèmes qui dépendent du nombre de véhicules ayant les options A et B simultanément :

- Soit $q_{AB} < Q^-$, le nombre de véhicules ayant les options A et B simultanément dans le programme de production P est strictement inférieur au nombre de véhicules ayant les deux options dans la liste idéale,
- Soit $Q^- \leq q_{AB} \leq Q^+$, selon la conjecture que nous avons présentée ci-dessus, il existe une séquence sans non respect,
- Soit $q_{AB} > Q^+$, le nombre de véhicules ayant les options A et B simultanément dans le programme de production P est strictement supérieur au nombre de véhicules ayant les deux options dans la liste idéale.

Rappelons que $Q^- = \min_{i \in L} (q_{liste_{AB}}(i))$ et $Q^+ = \max_{i \in L} (q_{liste_{AB}}(i))$.

Ces sous problèmes, décrits en annexe G, enchaînent différentes phases qui consistent d'abord à utiliser la flexibilité disponible, puis, à minimiser la création de non respects dus au déplacement d'une seule option, l'option A. Ces phases sont interrompues dès que le nombre de véhicules ayant les deux options dans la liste en cours de modification, l' , atteint le nombre de véhicules ayant les deux options dans le programme de production, q_{AB} .

Suite au traitement lié aux phases d'un des trois sous problèmes, nous disposons d'une liste idéale modifiée, l' , telle que $q_{liste_{AB}}(l') = q_{AB}$. Le risque de non respects de cette liste correspond au nombre de non respects de la contrainte d'espacement A.

4.4.3.4. ÉTAPE 4 : REINTEGRATION DES QUANTITES ECARTEES

Lors de la première étape, nous avons écarté les options en trop qui ne permettraient pas de produire le volume induit par les ratios négociés. Le principe de cette étape, détaillé dans l'annexe H, consiste à ajouter ces options en partant de la fin de la liste construite à la suite de la troisième étape.

Le nombre de non respects présents dans la liste idéale modifiée, l' , fournit alors un indicateur de difficulté à respecter les contraintes d'espacement. Plus, il y aura de non respects, plus il y aura de difficulté à respecter les contraintes d'espacement.

4.5. RESULTATS NUMERIQUES

Nous allons illustrer les valeurs des solutions obtenues avec l'algorithme PPLI en les comparant à celles de l'outil de séquençement adopté par le groupe PSA Peugeot Citroën.

4.5.1. CONSTRUCTION DES COURBES

Pour faire les figures présentes dans cette partie, nous avons fixé les données suivantes : Q_{tot} , Q_A , Q_B , N_A/P_A et N_B/P_B .

En abscisse, nous faisons varier le nombre de véhicules soumis aux deux contraintes simultanément (q_{AB} varie de la quantité minimale de véhicules possibles ayant les deux options, $\max(0, Q_A + Q_B - Q_{tot})$, à la quantité de véhicules possédant l'option la moins représentée, $\min(Q_A, Q_B)$). En ordonnée, nous avons la valeur de l'indicateur de difficulté à respecter les deux ratios (PPLI) et le nombre de non respects obtenu avec l'outil de séquençement actuellement utilisé par le groupe PSA Peugeot Citroën.

4.5.2. DES COURBES CARACTERISTIQUES

Les figures de 4.13 à 4.16 représentent les 4 courbes caractéristiques que nous avons identifiées avec l'indicateur de difficulté à respecter deux ratios. Nous pouvons associer une courbe en fonction de la relation qu'il existe entre P_A et P_B . Si P_A et P_B sont premiers entre eux, la courbe caractéristique aura le profil de la première courbe (figure 4.13). Si P_A et P_B sont multiples, la courbe caractéristique aura le profil de la deuxième courbe (figure 4.14). Si P_A et P_B ne sont ni premiers entre eux, ni multiples, la courbe caractéristique pourra avoir soit le profil de la troisième soit celui de la quatrième courbe (figure 4.15 et figure 4.16).

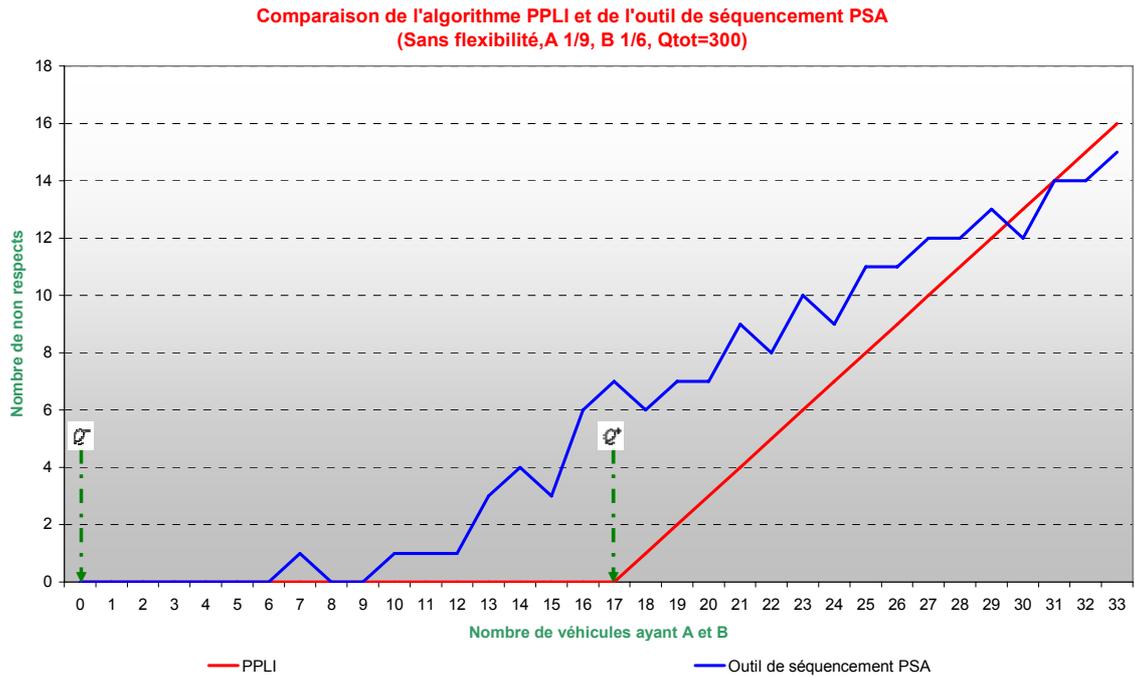


Figure 4.15 : A 1/6, B 1/9, $Q_{tot} = 300$, $Q_A = 50$, $Q_B = 33$, $I_{r_A} = 0$, $I_{r_B} = 0,01$

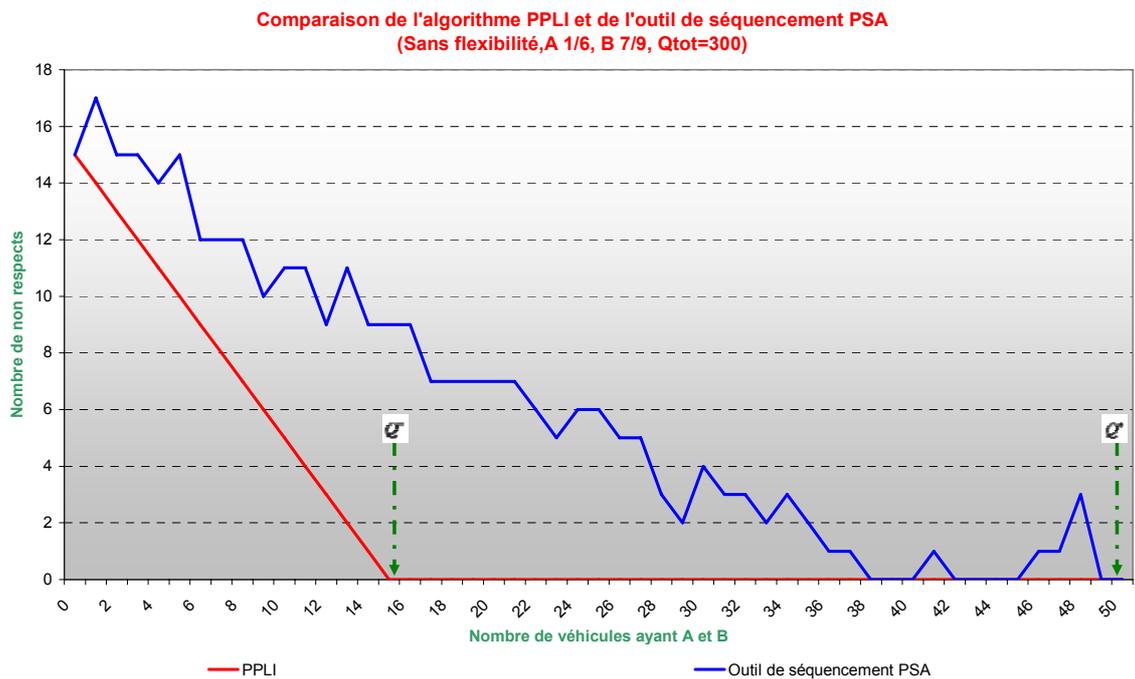


Figure 4.16 : A 1/6, B 7/9, $Q_{tot} = 300$, $Q_A = 50$, $Q_B = 233$, $I_{r_A} = 0$, $I_{r_B} = 0,001$

Sur ces figures, nous avons facilement représenté les valeurs de Q^- et Q^+ de la conjecture. Ces deux valeurs encadrent les valeurs du nombre de véhicules ayant les options A et B, q_{AB} , pour lesquelles le nombre de non respects est nul.

L'algorithme PPLI estime le nombre de non respects d'un programme de production, P , entre 0,01 s et 0,2 s limité à deux contraintes d'espace. L'outil de séquençement du groupe PSA Peugeot Citroën a besoin d'environ 10 s¹⁴ pour calculer le nombre de non respects de ce même programme de production, P . Cet écart de temps peut être considéré comme minime mais ramener à l'ensemble des couples de contraintes d'espace à analyser, nous verrons, dans la partie qui suit, le gain que cela peut occasionner.

De plus, les courbes ci-dessus mettent également en évidence les limites de l'outil de séquençement du groupe PSA Peugeot Citroën. Pour la figure 4.15 à proximité de Q^+ , l'outil de séquençement ne semble pas capable de trouver une solution sans non respect. Nous constatons le même handicap pour la figure 4.16 à proximité de Q^- .

4.5.3. IMPACT DE LA FLEXIBILITE SUR LES COURBES

Les contraintes d'espace utilisées pour construire les figures de 4.13 à 4.16 ont un indicateur de difficulté à respecter un ratio nul ou très proche de 0 ($0 \leq I_r \leq 0,01$). Pour certains ratios, comme 1/9, les valeurs non nulles correspondent aux volumes arrondis. Mais, en pratique, les indicateurs de difficulté à respecter un ratio sont rarement aussi proches de 0.

La figure 4.17 illustre le comportement du phénomène des interactions de contraintes en présence de flexibilité. Pour représenter cette figure, nous avons utilisé la même valeur de $Q_{tot} = 300$ et les mêmes ratios pour les deux contraintes d'espace, A 2/5 et B 3/7 que la figure 4.15. Par contre, nous n'avons pas utilisé les mêmes volumes, $Q_A = 116$ au lieu de $Q_A = 120$ et $Q_B = 124$ au lieu de $Q_B = 128$. Cet écart représente environ 3% pour chacune des deux contraintes d'espace, soit $I_r \approx 0,03$.

¹⁴ « 10 secondes » est le temps imparti à l'outil de séquençement du groupe PSA Peugeot Citroën pour construire la liste des véhicules à respecter à l'entrée de l'atelier montage.

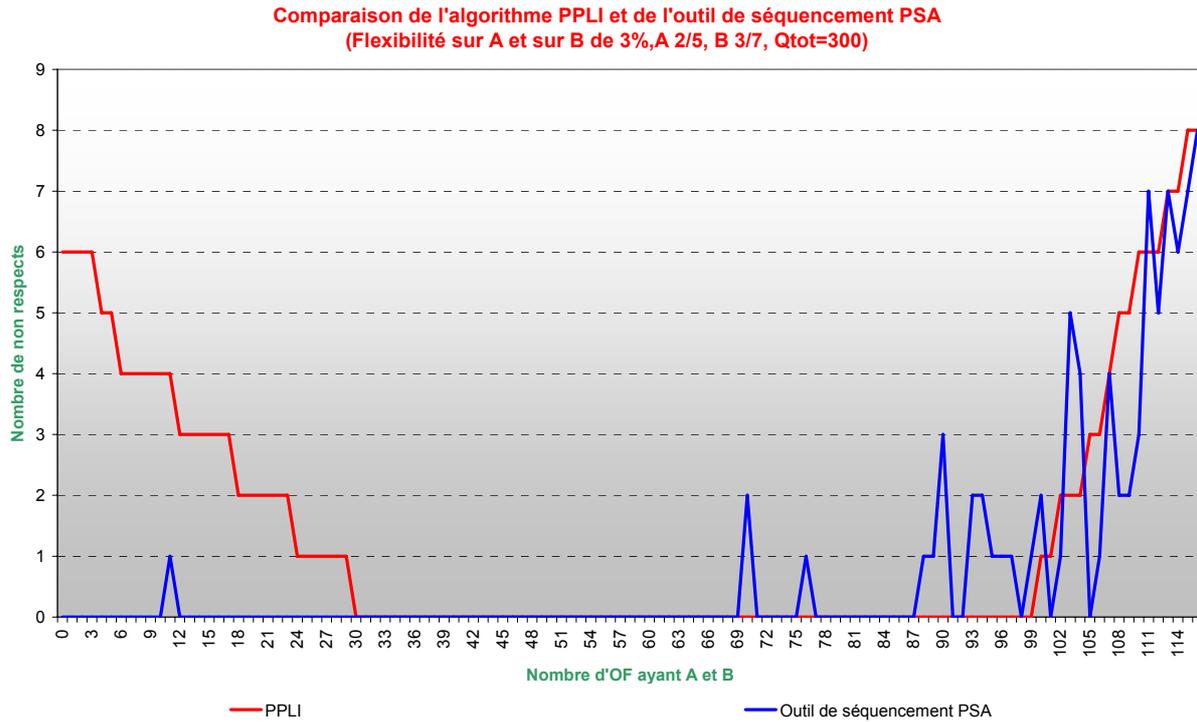


Figure 4.17 : A 2/5, B 3/7, $Q_{tot} = 300$, $Q_A = 116$, $Q_B = 124$, $I_{r_A} = 0,033$, $I_{r_B} = 0,036$

Entre la figure 4.13 et la figure 4.17, nous constatons que la zone correspondant à l'absence de non respects s'est agrandie. Pour la figure 4.13, cette zone s'étale entre 48 et 63 véhicules ayant les deux options simultanément. Et, pour la figure 4.17, elle s'étale entre 30 et 99. Et, dès que $I_{r_A} > 0,05$ et $I_{r_B} > 0,05$, soit un écart de 5%, notre modélisation indique qu'il n'existe plus aucun risque de non respects. Cette absence de non respect est confirmée par l'outil de séquençage qui est capable de construire des séquences de véhicules ne provoquant aucun non respect.

De manière générale, au cours de nos expérimentations, nous avons observé que l'algorithme PPLI présentait un intérêt si $0 \leq I_r \leq 0,1$. En raison de sa rapidité et de la qualité des résultats obtenus, la valeur obtenue avec l'algorithme PPLI est utilisée dans l'outil d'aide à l'analyse des interactions de contraintes que nous vous présentons dans la partie suivante.

4.6. OUTIL D'AIDE A L'ANALYSE DES INTERACTIONS DE CONTRAINTES

Auparavant, la coordination de production analysait *a posteriori* la qualité de la liste des véhicules à engager au montage. Elle informait ensuite les responsables de l'atelier

montage sur les non respects de contraintes d'espace. Pour faire face à ces difficultés, l'atelier montage renforce les postes de travail concernés et la liste n'est pas remise en cause. Au jour le jour, l'outil d'aide à l'analyse des interactions de contraintes que nous proposons offre une analyse *a priori*. Cet outil peut être utilisé dans deux situations :

- Anticiper les éventuelles surcharges liées à un non respect des contraintes d'espace. Pour cibler le renforcement des postes de travail, cet outil permet à la coordination de production et aux équilibriers de renégocier les ratios et d'observer les impacts de cette renégociation sur le séquençage potentiel.
- Adapter intelligemment les ratios des contraintes d'espace de l'outil de séquençage pour se conformer au programme de production.

4.6.1. OUTIL D'AIDE A L'ANALYSE

A partir du programme de production de la journée, l'outil d'aide à l'analyse, décrit par la figure 4.18, est divisé en deux parties : les indicateurs généraux qui aident l'utilisateur à prendre des décisions et la matrice des interactions de contraintes deux à deux pour identifier précisément les contraintes d'espace nécessitant un ajustement de leur ratio.

775	CJ27O009	CJ27O007	CJ27O003	CJ23O015	CJ27O008	CJ27O001	CJ27O005	CJ27O006	CJ27O002	CJ27O004	CJ21O003
Volume	126	19	19	127	139	10	76	162	168	139	309
Taux	16,3 %	2,5 %	2,5 %	16,4 %	17,9 %	1,3 %	9,8 %	20,9 %	21,7 %	17,9 %	39,9 %
Ir	0,025	0,019	0,019	0,017	0,103	0,006	0,019	0,164	0,133	0,103	0,203
Ratio	1/6	1/40	1/40	1	Indicateurs généraux			1/4	1/4	1/5	1/2
Nb viols (l.esp)	2	0	6	7	0	1	2	0	0	0	0
Nb viols (Simu.)	15	1	6	16	16	0	3	3	1	5	0
Nb viols (Négo.)	4	1	4	4	8	0	2	1	1	4	0
CJ27O009		0	1	0	0	0	1	0	0	0	0
CJ27O007	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0
CJ27O003	1	0		5	0	0	0	0	0	0	0
CJ23O015	0	0	5		0	1	1	0	0	0	0
CJ27O008	0	0	0					0	0	0	0
CJ27O001	0	0	0		Matrice des interactions			0	0	0	0
CJ27O005	1	0	0	1	0	0		0	0	0	0
CJ27O006	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0
CJ27O002	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0
CJ27O004	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0
CJ21O003	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Figure 4.18 : Outil d'aide à l'analyse des interactions de contraintes

Les indicateurs généraux sont :

- Le volume et le taux des options soumises à la contrainte d'espace dans l'ensemble des véhicules à séquencer,
- L'indicateur de difficulté à respecter le ratio de la contrainte d'espace, I_r , (équation 4.1),
- Le ratio à appliquer à la contrainte d'espace, ce ratio doit être choisi parmi l'ensemble des ratios compatibles applicables du ratio négocié (Cf. 4.3.1.5),

- Le nombre de non respects est évalué selon trois méthodes. La première est la somme de la colonne de la matrice, « Nb viols (I.esp) ». Elle représente la difficulté à respecter cette contrainte par rapport aux autres. La deuxième et la troisième méthode concernent l'évaluation du nombre de non respects d'une liste séquencée avec l'outil de séquençement du groupe PSA Peugeot Citroën et minimisant le nombre de non respects des ratios choisis par l'utilisateur. La deuxième méthode, « Nb viols (Simu) », compte le nombre de non respects des ratios choisis par l'utilisateur. La troisième méthode, « Nb viols (Négo) », compte le nombre de non respects des ratios négociés.

Dans un premier temps, pour être sûr de respecter chaque contrainte d'espacement individuellement, il est nécessaire d'avoir tous les indicateurs de difficulté à respecter un ratio positif ou nul. Puis, pour considérer que nous n'avons pas de problèmes d'interactions de contraintes d'espacement deux à deux, il est nécessaire d'avoir une matrice des interactions nulle. Enfin, pour garantir une absence de non respects, les simulations que nous pouvons réaliser avec l'outil de séquençement PSA Peugeot Citroën devront fournir une séquence ne comportant aucun non respect.

4.6.2. CHOIX DES CONTRAINTES A AJUSTER

Que ce soit pour l'anticipation des difficultés ou l'ajustement des ratios des contraintes d'espacement, la matrice des interactions de contrainte nous aide dans le choix des contraintes d'espacement qu'il faut adapter. Initialement, si deux contraintes d'espacement avec les ratios négociés ont des problèmes d'interactions, la cellule de la matrice correspondant à leur couple aura une valeur strictement positive (cellules jaunes dans la matrice des interactions de la figure 4.18).

Afin de supprimer les interactions de ces deux contraintes, il est nécessaire de relâcher une des deux contraintes ou les deux. La contrainte à relâcher en priorité est celle qui aura le moins d'impact pour l'atelier montage.

Par exemple, soit deux contraintes pour lesquelles il existe une interaction de contraintes, la contrainte d'espacement A contraint 5 postes de travail et la contrainte d'espacement B contraint 1 poste de travail, il est préférable de relâcher la contrainte d'espacement B qui, *a priori*, perturbera moins l'atelier que la contrainte d'espacement A. Le relâchement d'une des deux contraintes d'espacement, dans ce cas, nécessite l'établissement

d'un dialogue avec les équilibreurs pour choisir la solution la plus raisonnable ou pour les informer des difficultés potentielles.

4.6.3. L'AJUSTEMENT DES RATIOS AU PROGRAMME DE PRODUCTION

Quotidiennement, cet outil peut aider l'utilisateur à adapter intelligemment les ratios au plus près du programme de production selon le mode d'emploi suivant.

Etape 1 : Les ratios des contraintes d'espacement sont initialisés comme étant les ratios que nous jugeons les plus « stricts ». Si nous avons le choix entre un ratio 4/7 ou un ratio 1/2, nous jugerons le ratio 1/2 plus strict que le ratio 4/7, cas permettant un nombre de véhicules plus faible.

La matrice des interactions de contraintes contient probablement des valeurs non nulles que nous allons supprimer dans l'étape suivante.

Etape 2 : Les ratios des contraintes d'espacement doivent être adaptés pour éliminer les impacts liés aux interactions de contraintes prises deux à deux. Ces impacts sont réduits dès que la matrice des interactions est nulle.

Tant que l'un des deux ratios à adapter reste dans l'ensemble des ratios compatibles applicables du ratio négocié, nous préconisons l'adaptation du ratio le moins « strict ». Par exemple, si nous avons le choix entre modifier le ratio 1/17 ou le ratio 1/6, nous choisissons prioritairement 1/17 car il est moins « strict » que 1/6. Si il faut choisir un ratio qui n'est pas dans l'ensemble des ratios compatibles applicables du ratio négocié, l'adaptation des ratios des contraintes d'espacement répond aux critères de choix que nous avons présentés dans la partie précédente (Cf. 4.6.2).

A la fin de cette étape, la matrice des interactions est nulle mais cela ne signifie pas que nous n'avons plus d'interactions pour l'ensemble des contraintes d'espacement car il peut exister des interactions de 3 contraintes d'espacement ou plus générant des non respects.

Etape 3 : A l'aide de l'outil de séquençement du groupe PSA Peugeot Citroën, nous procédons à une méthode itérative de type Essai-Erreur jusqu'à obtenir un nombre de non respects négociés nul ou négligeable. A chaque itération, nous sélectionnons arbitrairement la

contrainte d'espacement ayant le plus grand nombre de non respects des ratios négociés, puis, nous modifions le ratio choisi.

Cependant, lorsqu'il n'existe pas de ratios permettant d'obtenir une solution acceptable, il peut être nécessaire de relâcher un des ratios au-delà de la limite négociée entre le bureau des méthodes et la coordination de production. Dans ce cas, il faut étudier les impacts avec les équilibres pour trouver une solution plus adaptée en renforçant les postes de travail concernés.

L'ensemble des ratios des contraintes d'espacement que nous obtenons ainsi, nous permet de paramétrer judicieusement l'outil de séquençement du groupe PSA Peugeot Citroën.

4.6.4. EXEMPLE D'UTILISATION

Nous allons illustrer ce mode d'emploi avec la journée de production du 22 Février 2005 de la ligne d'assemblage L2 du site de production de Rennes. La figure 4.19 représente l'outil d'aide à l'analyse des interactions de contraintes du programme de production de cette journée. Au mois de Février 2005, le bureau des méthodes et la coordination de production ont négocié 11 contraintes d'espacement (de CJ27O009 à CJ21O003). Le ratio des contraintes négociées a été reporté sur la ligne « Ratio » et le nombre de véhicules soumis à chacune des contraintes d'espacement sur la ligne « Volume ». Ici, le programme de production contient 775 véhicules et ne compte pas d'interactions de contraintes.

775	CJ27O009	CJ27O007	CJ27O003	CJ23O015	CJ27O008	CJ27O001	CJ27O005	CJ27O006	CJ27O002	CJ27O004	CJ21O003
Volume	126	19	19	127	139	10	76	162	168	139	309
Taux	16,3 %	2,5 %	2,5 %	16,4 %	17,9 %	1,3 %	9,8 %	20,9 %	21,7 %	17,9 %	39,9 %
Ir	0,512	0,510	0,510	0,508	0,462	0,871	0,608	0,582	0,350	0,283	0,203
Ratio	1/3	1/20	1/20	1/3	1/3	1/10	1/4	1/2	1/3	1/4	1/2
Nb viols (L.esp)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Nb viols (Simu.)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Nb viols (Négo.)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CJ27O009	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CJ27O007	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CJ27O003	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CJ23O015	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CJ27O008	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CJ27O001	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CJ27O005	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CJ27O006	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CJ27O002	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CJ27O004	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CJ21O003	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figure 4.19 : Analyse des interactions de contraintes du 22/02/2005 à Rennes – L2

En appliquant le mode d'emploi décrit ci-dessus pour ajuster les ratios au programme de production, nous avons eu besoin de 16 itérations. Le résultat de cet ajustement est décrit dans le tableau 4.3. L'évolution du nombre de non respects itération par itération est représentée par la figure 4.20.

Dans le tableau 4.3, pour chacune des contraintes d'espacement, nous avons indiqué son nom (CJ27O009), le nombre de véhicules du 22/02/2005 soumis à la contrainte d'espacement (126), le ratio négocié (1/3) et l'indicateur de difficulté à le respecter (0,512), et le ratio ajusté (1/5) et l'indicateur de difficulté à le respecter (0,187). Les lignes en bleu clair représentent les contraintes d'espacement ayant eu un ratio ajusté.

Contrainte	Quantité	Initialement		Après ajustement	
	775	Ratio	Ir	Ratio	Ir
CJ27O009	126	1/3	0,512	1/5	0,187
CJ27O007	19	1/20	0,510	1/40	0,019
CJ27O003	19	1/20	0,510	1/30	0,265
CJ23O015	127	1/3	0,508	1/3	0,508
CJ27O008	139	1/3	0,462	1/3	0,462
CJ27O001	10	1/10	0,871	1/76	0,019
CJ27O005	76	1/4	0,608	1/8	0,215
CJ27O006	162	1/2	0,582	1/4	0,164
CJ27O002	168	1/3	0,350	1/4	0,133
CJ27O004	139	1/4	0,283	1/4	0,283
CJ21O003	309	1/2	0,203	1/2	0,203

Tableau 4.3 : Résultat de l'ajustement des ratios du 22/02/2005 à Rennes – L2

La figure 4.20 permet de distinguer aisément les 3 étapes du mode d'emploi. La première itération représente la première étape (initialisation). La 7^{ème} itération représente la fin de la 2^{ème} étape et le début de la 3^{ème} (matrice des interactions de contraintes nulle), et la 16^{ème} itération, la fin de la 3^{ème} étape (nombre de non respects nul).

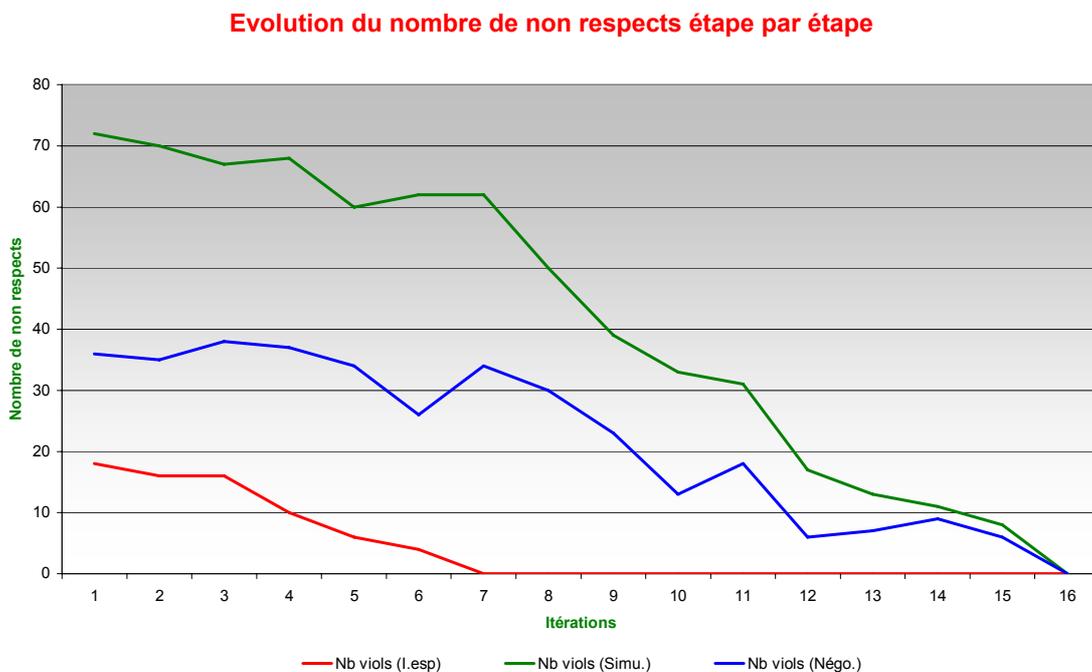


Figure 4.20 : Evolution du nombre de non respects itération par itération

Tous les matins, la coordination de production dispose de peu de temps (quelques minutes au plus) pour analyser la séquence de véhicules à engager, valider le résultat et pour informer les responsables de l'atelier montage. Pour cet exemple, l'ajustement a été réalisé en une quinzaine de minutes ce qui est acceptable.

4.7. CONCLUSION

Dans le chapitre précédent, nous avons précisé qu'un non respect de contraintes pouvait engendrer le renforcement d'un ou plusieurs postes de travail. Par conséquent, un des objectifs du séquençage consiste à minimiser le nombre de non respects. Mais, obtenir une séquence sans non respect est parfois très difficile même si individuellement chaque contrainte d'espacement est respectable.

Dans ce chapitre, nous avons présenté un indicateur de difficulté à respecter un ratio. Nous avons proposé un indicateur de difficulté à respecter deux ratios à partir d'un phénomène nouvellement identifié que nous avons nommé « les interactions de contraintes ». Nous avons démontré 3 propriétés et nous avons énoncé une conjecture montrant l'absence de non respects. Enfin, nous avons décrit un outil d'aide à l'analyse des interactions nous permettant d'anticiper la difficulté à respecter toutes les contraintes d'espacement.

Avec l'outil d'aide à l'analyse des interactions de contraintes, nous pouvons identifier plus précisément les contraintes d'espacement responsables des non respects. Ceci permet au responsable de l'ordonnancement de s'assurer de la faisabilité du programme de production et d'élaborer, en relation avec les équilibriers, des plans d'actions adaptés pour l'atelier montage quand cela est nécessaire.

La modélisation que nous avons proposée s'est limitée à deux contraintes d'espacement. En effet, au delà de deux contraintes d'espacement, cela ne présente pas d'intérêt à cause de la complexité. D'un point de vue complexité, le nombre de situations à analyser croît de manière exponentielle par rapport au nombre de contraintes d'espacement prises en compte simultanément, c'est-à-dire, de l'ordre de $N^{\#Cnt}$ avec N , le nombre de contraintes à respecter et $\#Cnt$, le nombre de contraintes à prendre en compte simultanément. Par conséquent, le temps de traitement et d'analyse des résultats peut s'avérer plus coûteux qu'une simple simulation comme nous le proposons dans l'outil d'aide à l'analyse des interactions.

En pratique, la modélisation que nous avons proposé pour l'indicateur de difficulté à respecter deux ratios a modifié la perception du phénomène des interactions de contraintes. Nous avons unifié des phénomènes traités jusqu'alors indépendamment (les options

exclusives et les options croisées). Et, la courbe caractéristique en « V » et la conjecture permettent à la coordination de production de mieux appréhender ce phénomène.

5. La mesure de la flexibilité

Dans le premier chapitre, nous avons défini la flexibilité demandée à l'atelier montage comme étant la capacité à absorber les erreurs de prévisions, les difficultés à séquencer les véhicules et les aléas de production. Cette flexibilité se matérialise par la définition d'une marge de sécurisation. Cette marge de sécurisation doit être prise en compte par le bureau des méthodes, lors de l'équilibrage de la ligne d'assemblage, pour dimensionner les postes de travail. Ce dimensionnement doit permettre à la coordination de production de produire les véhicules commandés par les clients et d'espacer les véhicules provoquant un pic de charge pour garantir aux opérateurs la possibilité de réaliser leur travail sans solliciter l'aide d'un opérateur polyvalent.

Cependant, comme nous l'avons noté dans le deuxième chapitre, le bureau des méthodes accepte ou refuse la marge de sécurisation demandée par la coordination de production en fonction de leur expérience et de leur connaissance du terrain. Il n'existe pas de mesure évaluant 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 et la justification de l'acceptation ou du refus peut être infondée.

Dans ce chapitre, nous proposerons une méthode pour évaluer la capacité maximale de production d'un poste de travail et d'une contrainte d'espacement. Puis, nous décrirons une classification des postes de travail qui aidera les équilibreur à ajuster l'équilibrage à la flexibilité demandée. Enfin, nous proposerons une adaptation du processus de négociation des contraintes pour intégrer au mieux la flexibilité demandée et pour homogénéiser les modes de fonctionnement des usines terminales.

5.1. MESURE DE LA FLEXIBILITE

Connaître les capacités maximales de production pour chaque type de véhicules devant être espacé est indispensable pour identifier la nature des modifications à apporter aux postes de travail.

Nous décrirons quelques approches abordées dans la littérature. Puis, nous présenterons la méthode que nous avons utilisée. Enfin, avec la capacité maximale de production et les données prévisionnelles, nous allons proposer une classification permettant aux équilibreur d'identifier clairement les postes de travail à adapter.

5.1.1. *ETAT DE L'ART*

Pour 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.

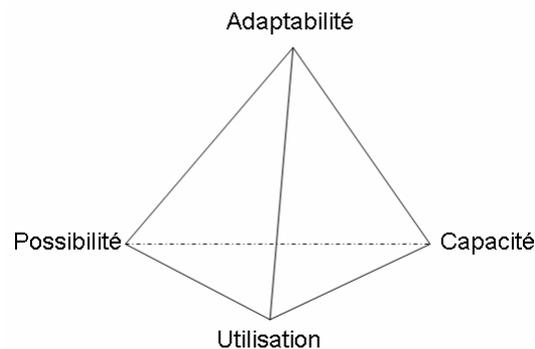


Figure 5.1 : Éléments structurels composant un système de production flexible

Pour disposer d'une ligne d'assemblage automobile flexible, l'équilibrage doit considérer les 4 éléments ci-dessus simultanément. Les équilibreurs 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.

Les méthodes de mesure abordées dans la littérature disposent de caractéristiques communes (Thomas et al., 2002) :

- **Absolute / Relative** : certaines mesures construisent une échelle de valeurs, alors que d'autres sont basées sur la comparaison de situations, le but étant de déterminer celle qui est la plus flexible,
- **Directe / Indirecte** : la mesure peut se faire soit sur le système lui-même soit à partir d'indicateurs de performance comme les bénéfices dégagés, le niveau des stocks, ...
- **Générique / Dédiciée** : les systèmes de mesure peuvent être construits pour s'appliquer à tout type de flexibilité ou uniquement à des dimensions particulières (main d'œuvre, équipement, processus, volume, ...). Ils peuvent également être conçus pour un cas industriel ou un type d'industrie donné.

Selon les caractéristiques décrites ci-dessus, la mesure que nous proposons est une mesure relative, directe et dédiée (Ferioli, 2006). Elle est relative car nous comparons le niveau de production maximum au niveau de production prévu en fonction d'un équilibrage donné. Elle est directe car la mesure s'applique sur l'équilibrage courant ou envisagé. Et pour finir, elle est dédiée car cette mesure ne s'applique directement qu'à une ligne d'assemblage à modèles mélangés (Mixed Model Line).

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 5.1).

$$F = \frac{C_{\max} - Seuil}{C_{\max}} \quad (5.1)$$

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 capable de produire les volumes prévus.

Dans un premier temps, notre approche consiste à proposer une mesure de la capacité maximale de production en fonction des possibilités de la ligne d'assemblage. Puis, dans un

deuxième temps, nous allons proposer différents indicateurs qui permettront aux équilibres d'étudier les adaptations nécessaires pour répondre aux besoins commerciaux.

5.1.2. EVALUATION DE LA CAPACITE MAXIMALE DE PRODUCTION

Nous avons dégagé deux façons de calculer la capacité maximale de production d'un poste de travail et d'une contrainte d'espacement : statique et dynamique. La capacité maximale statique 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. La capacité maximale dynamique consiste à évaluer le nombre maximal de véhicules qui peuvent être séquencés en respectant le ratio permettant aux opérateurs de travailler sans solliciter l'aide d'un opérateur polyvalent.

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

5.1.2.1. LA CAPACITE MAXIMALE STATIQUE

5.1.2.1.1. POUR UN POSTE DE TRAVAIL

Dans le chapitre 3, nous avons considéré deux groupes de véhicules par poste de travail : les véhicules ne provoquant pas de pic de charge et les véhicules provoquant un pic de charge. Comme les temps de traitement pour les véhicules dans ces deux groupes ne sont pas toujours homogènes, il est difficile d'évaluer le volume maximal du groupe des véhicules provoquant un pic de charge sans simplifier l'approche (Cf. 3.3.1).

Comme nous venons de l'introduire, la capacité maximale statique consiste à évaluer le nombre maximal de véhicules provoquant un pic de charge sur un poste de travail tel que la charge de travail de l'opérateur soit le plus proche possible de l'objectif visé. L'objectif visé est atteint lorsque le poste de travail a un coefficient d'équilibrage (Cf. 1.2.4.2.4) correspondant au coefficient d'équilibrage fixé dans les bonnes pratiques du groupe, Ke_{obj} . Cette approche considère uniquement la charge de travail de l'opérateur. L'ordre des véhicules n'est pas pris en compte.

En considérant deux temps, T_{inf_i} et T_{sup_i} , utilisés pour le calcul du ratio N_i/P_i d'un poste de travail i (équation 3.8), il est alors aisé d'évaluer le nombre maximal de véhicules provoquant un pic de charge pouvant être produit sur ce poste de travail, Q'_{max_i} . Ce nombre est la plus grande valeur entière répondant à la condition suivante :

$$\frac{Q_{tot} * T_{cycle}}{(Q_{tot} - Q'_{max_i}) * T_{inf_i} + Q'_{max_i} * T_{sup_i}} \leq Ke_{obj} \quad (5.2)$$

Soit

$$Q'_{max_i} = \left[Q_{tot} * \frac{\frac{T_{cycle}}{Ke_{obj}} - T_{inf_i}}{T_{sup_i} - T_{inf_i}} \right] \quad (5.3)$$

Avec Q_{tot} , nombre de véhicules total,
 T_{cycle} , temps de cycle de la ligne d'assemblage,
 T_{inf_i} , temps de traitement d'un véhicule ne provoquant pas de pics de charge sur le poste i ,
 T_{sup_i} , temps de traitement d'un véhicule provoquant un pic de charge sur le poste de travail i .

Pour illustrer ce calcul, nous avons considéré le poste de travail dont la charge de travail est représentée sur la figure 5.2. Nous avons simplifié les temps de traitement des deux groupes de véhicules en considérant la situation au pire des cas ($T_{inf_i} = 0,30$ et $T_{sup_i} = 1,20$).

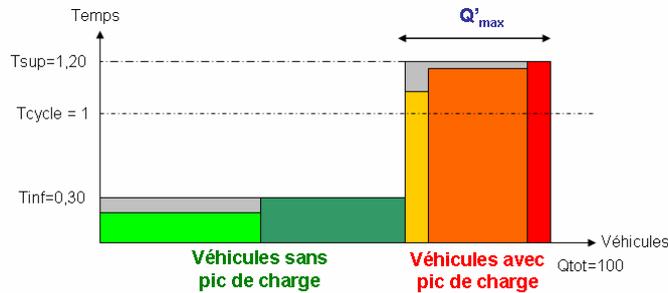


Figure 5.2 : Représentation de la charge de travail d'un poste de travail

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.

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

5.1.2.1.2. POUR UNE CONTRAINTE D'ESPACEMENT

Une contrainte d'espacement peut contraindre plusieurs postes de travail (Cf. 3.3.3). 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 5.4).

$$Q'_{\max_c} = \min_{i \in Pc_c} (Q'_{\max_i}) \quad (5.4)$$

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

5.1.2.2. LA CAPACITE MAXIMALE DYNAMIQUE

5.1.2.2.1. POUR UN POSTE DE TRAVAIL

La capacité maximale dynamique d'un poste de travail est celle qui correspond au nombre maximal de véhicules qui garantit le respect du ratio. Cette capacité maximale est calculée avec l'équation 3.10.

Pour l'exemple précédent, l'espace de travail du poste de travail est limité au début de son pas de travail, $Min_i = 0$, et à un dépassement de la fin du pas de travail autorisé de 0,3 minute, $Max_i = 1,3$.

Donc, selon l'équation (3.8), le ratio à appliquer sur ce poste de travail est 1/2.

Par conséquent, selon l'équation (3.10), nous pouvons, théoriquement, engager $Q_{\max} = \left\lfloor 100 * \frac{1}{2} \right\rfloor = 50$ véhicules sans provoquer de non respects du ratio 1/2.

5.1.2.2.2. POUR UNE CONTRAINTE D'ESPACEMENT

L'exemple ci-dessus illustre le cas d'un poste de travail. Dans le cas d'une contrainte d'espacement, nous pouvons procéder de la même façon. Le ratio N/P doit être choisi parmi l'ensemble des ratios compatibles communs (équation 3.11) à tous les postes de travail contraints par cette contrainte d'espacement.

5.1.2.3. LES PERTES D'EFFICACITE

Avant de calculer le ratio d'une contrainte d'espacement, nous simplifions les temps des postes de travail concernés (Cf. 3.3.1). Puis, nous calculons un ratio N/P pour chaque poste de travail (Cf. 3.3.2.). Enfin, nous choisissons un ratio compatible et commun à tous les postes de travail (Cf. 3.3.3) 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.

5.1.2.3.1. DUE A LA SIMPLIFICATION DES TEMPS

Cette étape consiste à définir deux temps à partir d'une gamme de temps pouvant être très hétérogène. 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 5.5). 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 5.2 représentent cette perte d'efficacité.

$$P_{temps_i} = \frac{(Q_i * T_{sup_i} + (Q_{tot} - Q_i) * T_{inf_i}) - \sum_{j=1}^{Q_{tot}} T_{i,j}}{Q_{tot} * T_{cycle}} \quad (5.5)$$

Avec Q_{tot} , nombre de véhicules produits ou à produire

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

T_{cycle} , temps de cycle de la ligne d'assemblage

Q_i , nombre de véhicules provoquant un pic de charge, *i.e.* $T_{i,j} > T_{cycle}$

Nous allons illustrer le calcul de cet indicateur avec le poste de travail dont la charge est représentée par la figure 5.2. Les temps de traitement des véhicules sur ce poste de travail se répartissent selon le tableau suivant :

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

Tableau 5.1 : 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.

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

5.1.2.3.2. 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 correspond à l'écart entre la capacité maximale statique, Q'_{\max_i} (équation 5.3), et la capacité maximale dynamique, Q_{\max_i} (équation 3.10), d'un poste de travail (équation 5.6).

$$P_{ratio_i} = Q'_{\max_i} - Q_{\max_i} \quad (5.6)$$

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.

5.1.2.3.3. 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 5.7), 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} (équation 5.3), et la capacité maximale dynamique de la contrainte d'espacement c , Q_{\max_c} (équation 3.10).

$$P'_{ratio_i} = Q'_{\max_i} - Q_{\max_c} \quad (5.7)$$

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.

La perte d'efficacité pour une contrainte d'espacement c due au choix d'un ratio N/P compatible et commun à tous les postes de travail contraints par cette même contrainte d'espacement, P'_{ratio_c} , correspond à la perte d'efficacité maximale des postes de travail contraints par cette contrainte (équation 5.8).

$$P'_{ratio_c} = \max_{i \in Pc_c} (P'_{ratio_i}) \quad (5.8)$$

5.1.2.3.4. *CONSEILS POUR UN EQUILIBRAGE 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'espace à avoir des ratios identiques tel qu'ils garantissent la possibilité pour les opérateurs de produire au moins les quantités prévues sans solliciter l'aide d'un opérateur polyvalent.

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

5.1.3. *LES INDICATEURS DE FLEXIBILITE*

Dans cette partie, nous allons mesurer la flexibilité potentielle totale (F.P.) et la flexibilité potentielle supplémentaire (F.P.S.) présente dans un équilibrage. Cette flexibilité correspond à l'écart entre la consommation moyenne journalière prévisionnelle majorée par une marge de sécurisation et la capacité maximale dynamique. Elle est 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.

Les indicateurs de flexibilité potentielle peuvent être calculés pour un poste de travail ou pour une contrainte d'espace en utilisant le principe de l'équation 5.1. Pour un poste de travail, nous considérerons les véhicules provoquant un pic de charge. Pour une contrainte d'espace, nous considérerons les véhicules répondant au critère de la contrainte d'espace.

Cette mesure peut se décliner selon le calcul de trois marges de sécurisation différentes (équation 1.3) :

- Sans marge de sécurisation ($I_f = 0$),
- Marge de sécurisation correspondant à la flexibilité offerte au commerce ($I_f = 1.5$),

- Marge de sécurisation correspondant à la flexibilité demandée au montage ($I_f = 2.5$).

L'indicateur de flexibilité potentielle totale, FPS_{totale} , mesure l'écart entre la consommation moyenne journalière prévisionnelle, CMJ , sans marge de sécurisation et la capacité maximale dynamique, Q_{max} (équation 5.9).

$$FPS_{totale} = \frac{Q_{max} - \left(CMJ + 0 * \sqrt{2 * CMJ * \left(1 - \frac{CMJ}{Q_{tot}} \right)} \right)}{Q_{max}} = \frac{Q_{max} - CMJ}{Q_{max}} \quad (5.9)$$

L'indicateur de flexibilité potentielle supplémentaire pour le commerce, $FPS_{commerce}$, mesure l'écart entre la consommation moyenne journalière prévisionnelle, CMJ , majorée de la flexibilité offerte au commerce (loi Hédin avec $I_f = 1.5$) et la capacité maximale dynamique, Q_{max} (équation 5.10).

$$FPS_{commerce} = \frac{Q_{max} - \left(CMJ + 1.5 * \sqrt{2 * CMJ * \left(1 - \frac{CMJ}{Q_{tot}} \right)} \right)}{Q_{max}} \quad (5.10)$$

L'indicateur de flexibilité potentielle supplémentaire pour le montage, $FPS_{montage}$, mesure l'écart entre la consommation moyenne journalière prévisionnelle, CMJ , majorée de la flexibilité demandée au montage (loi dite de « Hédin » avec $I_f = 2.5$) et la capacité maximale dynamique, Q_{max} (équation 5.11).

$$FPS_{montage} = \frac{Q_{max} - \left(CMJ + 2.5 * \sqrt{2 * CMJ * \left(1 - \frac{CMJ}{Q_{tot}} \right)} \right)}{Q_{max}} \quad (5.11)$$

5.1.3.1. SYNTHÈSE

La figure 5.3 illustre l'indicateur de flexibilité potentielle totale et les indicateurs de flexibilité potentielle supplémentaire pour le commerce et pour le montage par rapport à la représentation que nous avons déjà réalisée pour illustrer la marge de sécurisation (Cf. 1.4.2.2). Cet exemple montre un poste de travail ou une contrainte d'espace qui absorbe la flexibilité demandée au montage.

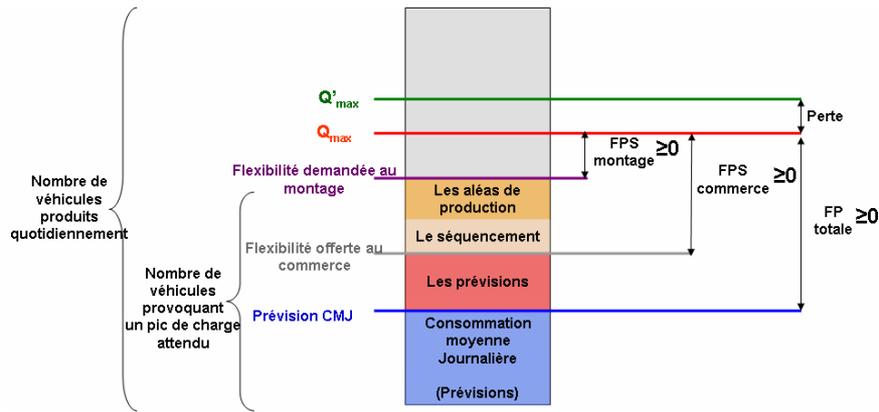


Figure 5.3 : Les indicateurs de perte d'efficacité et de flexibilité

Au début de l'année 2006, la direction commerciale s'est engagée vis à vis des usines terminales à limiter les variations dans la limite de la flexibilité offerte au commerce. Ce procédé est en test par le groupe PSA Peugeot Citroën suite à la collaboration avec le constructeur Toyota (partenaire dans la construction de la 107, C1 et Aygo). Cette pratique a été adoptée par Toyota depuis de nombreuses années.

5.1.4. CLASSIFICATION DES POSTES DE TRAVAIL

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

- **Un poste de travail sous dimensionné**, *i.e.* $FP_{totale} \leq 0$, n'est pas dimensionné pour accepter les véhicules prévisionnels (figure 5.4). 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.

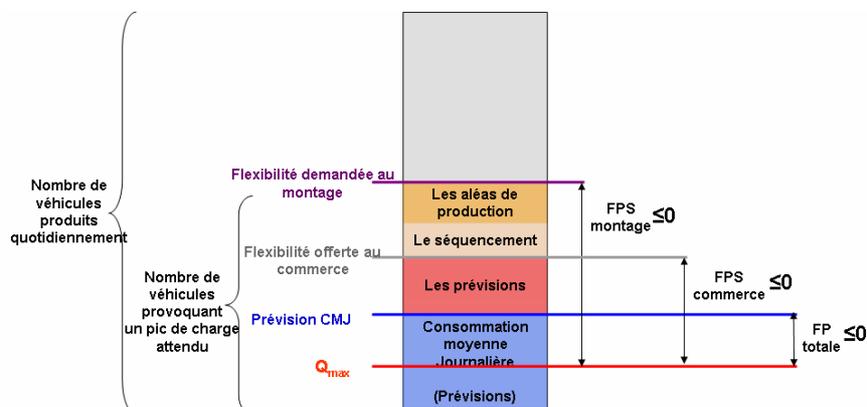


Figure 5.4 : Un poste sous dimensionné

- **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 et quotidienne risque de ne pas être absorbée (figure 5.5). Par conséquent, pour les journées où le volume du 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.

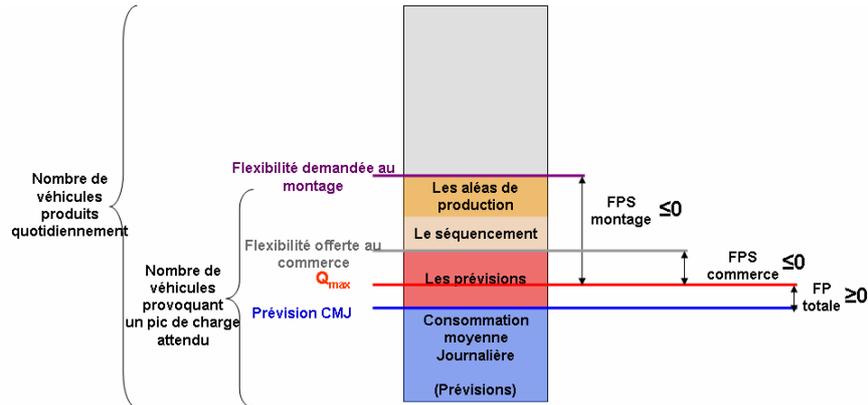


Figure 5.5 : Poste insuffisamment dimensionné

- **Un poste de travail présentant un risque de non absorption des aléas et des interactions de contraintes**, *i.e.* $FPS_{commerce} \geq 0$ et $FPS_{montage} \leq 0$, est un poste de travail pour lequel les équilibriers prennent un risque (figure 5.6). En effet, il peut être plus avantageux de renforcer ponctuellement le poste de travail que de le dimensionner pour le mois complet. Par conséquent, lorsqu'un aléa de production intervient ou lorsqu'une difficulté de séquencement est identifiée, l'équilibrier préférera renforcer avec un opérateur polyvalent le poste de travail concerné.

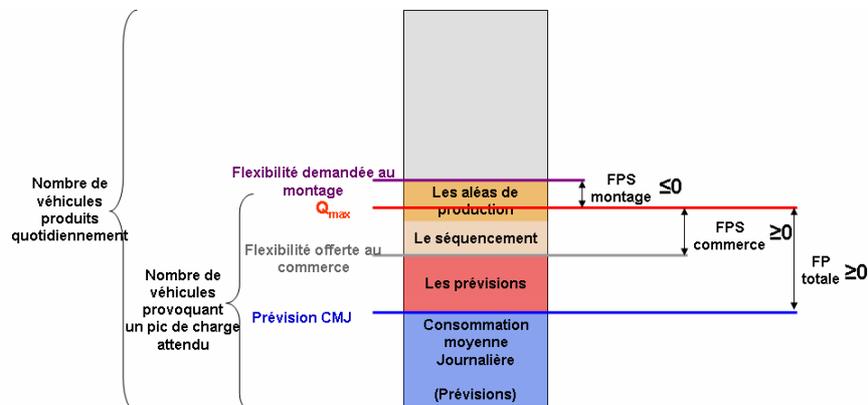


Figure 5.6 : Poste présentant un risque de dimensionnement insuffisant

- **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 5.3). Néanmoins, il faut être vigilant pour qu'il ne soit pas trop sur dimensionné. Sinon, ce poste de travail peut être une source de perte d'efficacité comme nous l'avons souligné en 5.1.3.3.

Cette classification est également applicable aux contraintes d'espace.

5.1.5. APPLICATION A UN CAS INDUSTRIEL

En collaboration avec les équilibreurs du site de production de Sevel Nord au mois de Mai 2006, nous avons étudié le dimensionnement des postes de travail de la ligne principale 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 les alertes. Les alertes ont été calculées avec la modélisation des opérateurs en difficulté que nous avons proposée dans la partie 3.1.

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. 217 opérateurs étaient affectés à ces 212 postes et seulement 3 postes avaient plus d'un opérateur.

5.1.5.1. CLASSIFICATION DES POSTES DE TRAVAIL

Pour chaque poste de travail ayant un véhicule provoquant un pic de charge selon les données prévisionnelles, nous avons évalué la valeur des 3 indicateurs de flexibilité potentielle supplémentaire et nous avons classé les postes de travail selon leur dimensionnement.

Le calcul de ces indicateurs repose sur les limites de l'espace de travail des opérateurs et sur la façon dont les deux temps de traitement caractérisant un poste de travail ayant des véhicules provoquant un pic de charge sont calculés. Les limites de l'espace de travail des postes de travail nous ont été transmises par les équilibreurs de Sevel Nord. Les temps de traitement des différents véhicules prévisionnels ont été calculés en fonction des données prévisionnelles du mois de mai 2006 et des schémas chronologiques des postes de travail de l'équilibrage réalisé pour le même mois. Les deux temps de traitement caractéristiques des postes de travail, T_{inf} et T_{sup} , ont été évalués selon 4 configurations :

- Le cas au mieux (mini) : les deux temps correspondent au temps minimum de chacun des deux groupes de véhicules,

- Le cas moyen (moyen) : les deux temps correspondent à la moyenne pondérée des temps,
- Le cas écrêté (écrêté): les deux temps correspondent au maximum des temps retenus par les équilibreurs,
- Le cas au pire (maxi) : les deux temps correspondent au temps maximum de chacun des deux groupes de véhicules.

Le résultat obtenu est décrit dans le tableau 5.2. 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.

Classe	Nombre de postes				Pourcentage de postes			
	Mini	Moyen	Ecrêté	Maxi	Mini	Moyen	Ecrêté	Maxi
SOUS	5	21	68	142	2,6%	10,8%	35,0%	73,1%
INSUFFISANT	2	13	17	3	1,0%	6,7%	8,8%	1,0%
RISQUE	1	6	9	0	0,5%	3,1%	4,6%	0,0%
SUR	186	154	100	49	95,9%	79,4%	51,6%	25,9%

Tableau 5.2 : Dimensionnement des postes de travail

Les 5 postes de travail sous dimensionnés dans le cas au mieux, *i.e.* « mini » ont fait apparaître une erreur dans les schémas chronologiques des postes de travail. D'après les équilibreurs, les corrections qui ne seront effectives qu'en Septembre 2006, nous garantissent que ces postes de travail ne seront plus sous dimensionnés pour le cas au mieux. De tels postes de travail sont aberrants car ils ne sont pas du tout adaptés pour répondre au besoin. Ils seront une source de nombreux non respects de contraintes, déclencheront de nombreuses alertes et nécessiteront de nombreuses interventions d'opérateurs polyvalents.

Pour le cas écrêté qui correspond à la tendance des équilibreurs (Cf. 3.3.2.4), environ la moitié des postes de travail sont mal dimensionnés (« SOUS », « INSUFFISANT » et « RISQUE »). Ces résultats montrent le travail qui doit encore être réalisé par les équilibreurs pour parvenir à un équilibrage qui assurera un ordonnancement de bonne qualité pour les opérateurs.

5.1.5.2. LIEN ENTRE LA CLASSIFICATION DES POSTES DE TRAVAIL ET LES ALERTES

Pour analyser le lien entre la classification des postes de travail et les alertes, nous avons retenu la classification des postes de travail réalisée avec la configuration du cas écrêté. Puis, nous avons considéré trois séquences de véhicules construites avec les véhicules produits le 24 Mai 2006 à Sevel Nord :

- La séquence des véhicules engagés dans l'atelier montage (EMON),
- Une séquence des véhicules minimisant directement le nombre d'alertes (Séquence obtenue avec l'outil de séquençement proposé par El Hadj Khalaf (2006)),
- Une séquence des véhicules minimisant le nombre de non respects des ratios de tous les postes de travail ayant un véhicule provoquant un pic de charge (Séquence obtenue avec l'outil de séquençement du groupe PSA Peugeot Citroën).

Classe	Nombre d'alertes			Pourcentage d'alertes		
	EMON	El Hadj Khalaf	ARI	EMON	El Hadj Khalaf	ARI
SOUS	1041	582	976	93,0%	90,7%	92,3%
INSUFFISANT	33	50	53	2,9%	7,8%	5,0%
RISQUE	7	2	2	0,6%	0,3%	0,2%
SUR	38	8	26	3,4%	1,2%	2,5%

Tableau 5.3 : Répartition des alertes de 3 séquences (24/05/2006)

Le tableau 5.3 représente le résultat de cette comparaison. Pour les trois séquences, les alertes se concentrent à plus de 90% sur les postes de travail sous dimensionnés. Si nous étendons l'analyse aux postes de travail mal dimensionnés (« SOUS », « INSUFFISANT » et « RISQUE »), les alertes s'y concentrent jusqu'à environ 99%.

5.1.5.3. CONCLUSION

Les résultats montrent qu'il existe un lien fort entre la classification des postes de travail proposée et les alertes. En effet, les alertes se produisent sur les postes de travail mal dimensionnés (« SOUS », « INSUFFISANT » et « RISQUE »). La réduction du nombre de postes de travail mal dimensionnés devrait donc permettre de réduire le nombre d'alertes.

Comme nous l'avons noté pour les 5 postes de travail sous dimensionnés, cette classification peut également identifier des anomalies dans le système d'information.

5.2. HARMONISATION DU PROCESSUS DE NEGOCIATION

La flexibilité de l'atelier montage n'est pas le seul résultat d'un calcul mathématique. Elle fait aussi partie d'un processus de négociation entre deux protagonistes importants dans la gestion de la chaîne logistique d'une usine terminale automobile : le bureau des méthodes et la coordination de production.

Nos propositions fournissent des informations qui permettent aux protagonistes d'argumenter leurs choix. Comme nous l'avions décrit dans le chapitre 2, le processus de négociation des contraintes d'espacement intervient pour un conflit qui porte sur les moyens de production et les limitations à mettre en œuvre pour répondre à la demande des clients. Et, pour résoudre ce conflit, il faut disposer d'objectifs faciles à comprendre, mesurables et opportuns (Hodgson, 1994).

Les objectifs sont faciles à comprendre. Le bureau des méthodes souhaite minimiser les coûts de dimensionnement de la ligne d'assemblage. La coordination de production souhaite garantir la production des véhicules commandés par les clients. Les informations que nous fournissons à l'aide de notre travail conduisent aux objectifs mesurables : minimiser le nombre de postes de travail mal dimensionnés et maximiser le rendement. Ces objectifs doivent permettre à termes aux protagonistes d'attribuer la flexibilité juste nécessaire.

Dans cette partie, nous proposons une évolution du processus de négociation pour prendre en compte les méthodes que nous avons définies dans le cadre de ces travaux. Le processus de négociation, décrit dans le chapitre 2, est composé de 4 étapes : la préparation, la négociation, l'exécution et l'animation. Nous proposons de faire évoluer le rôle des protagonistes et les différentes phases de ce processus. Ces évolutions aboutissent à la définition d'un processus qui peut être généralisable à l'ensemble des sites de production du groupe PSA Peugeot Citroën.

5.2.1. EVOLUTION DU ROLE DES PROTAGONISTES

Aujourd'hui, le bureau des méthodes définit les critères des contraintes d'espacement et les transmet à la coordination de production dès la réception des données prévisionnelles. La coordination de production évalue les marges de sécurisation et définit les ratios. La négociation consiste pour les équilibrateurs à accepter ou refuser les ratios proposés (Cf. 2.3.2.3.2).

Dans le chapitre 3, nous avons présenté une méthode pour définir les critères des contraintes d'espacement en fonction des véhicules provoquant un pic de charge et une

méthode pour calculer les ratios N/P en fonction de la charge de travail des opérateurs. Puis, dans le chapitre 4, nous avons proposé un outil d'aide à l'analyse des interactions de contrainte qui évalue la difficulté à respecter ces ratios. Enfin, dans ce chapitre, nous avons montré que la capacité maximale statique et la capacité maximale dynamique de chaque contrainte d'espacement dépendent de l'équilibrage de la ligne d'assemblage et des contraintes d'espacement.

Comme la coordination de production n'accède pas aux données d'équilibrage, nous en déduisons que la définition du critère, du ratio et de la capacité maximale d'une contrainte d'espacement doit être de la responsabilité du bureau des méthodes. La coordination de production doit s'assurer que les informations transmises par le bureau des méthodes sont conformes à la flexibilité demandée au montage, exploitables par le système d'information de l'entreprise et faciles à respecter lors du séquençement.

5.2.2. *EVOLUTION DE LA PREPARATION*

5.2.2.1. POUR LE BUREAU DES METHODES

Dès la réception des données prévisionnelles, le bureau des méthodes étudie l'impact des données prévisionnelles sur le dimensionnement des postes de travail. Il adapte les postes de travail sous dimensionnés afin de garantir la faisabilité des véhicules pouvant être commandés par les clients. Il recense les postes de travail insuffisamment dimensionnés ou présentant un risque de ne pas pouvoir absorber les aléas et les interactions de contraintes. Pour chacun de ces postes de travail, il évalue le coût de différentes alternatives d'adaptation pour les dimensionner au plus juste. Ces alternatives peuvent être l'ajout d'un opérateur, la modification des schémas chronologiques du poste de travail, l'évolution des infrastructures,...

Pour optimiser les rendements, l'équilibrage réalisé par le bureau des méthodes doit aussi minimiser les pertes. Cette optimisation s'obtient en homogénéisant les temps de traitement des véhicules autour de deux temps de traitement et, simultanément, en réduisant les écarts entre la capacité maximale statique et la capacité maximale dynamique.

A l'aide de la matrice colorée des relations (Cf. 3.2.4), le bureau des méthodes choisit les critères des contraintes d'espacement les plus représentatives. Cette étape leur permet de recenser les contraintes d'espacement à respecter.

Les critères, les ratios et les capacités maximales des contraintes d'espacement sont alors transmis à la coordination de production.

5.2.2.2. POUR LA COORDINATION DE PRODUCTION

La coordination de production peut alors vérifier que les informations transmises par le bureau des méthodes sont conformes à la flexibilité demandée au montage. Dans le cas où cela n'est pas conforme, la coordination de production doit également étudier les alternatives possibles pour respecter les capacités maximales demandées. Ces alternatives concernent, essentiellement, les différentes limitations que peut accepter la direction commerciale.

5.2.2.3. INFORMATIONS COMPLEMENTAIRES

Pour bénéficier de l'expérience acquise au cours des mois précédents, le bureau des méthodes et la coordination de production pourront s'aider des décisions antérieures et des indicateurs suivis durant l'étape d'animation des mois précédents pour prendre une décision. Ces indicateurs seront décrits ultérieurement (Cf. 5.2.5).

5.2.3. *EVOLUTION DE LA NEGOCIATION DES CONTRAINTES*

La préparation a permis au bureau des méthodes et à la coordination de production de construire leur argumentation. La réunion de négociation porte alors sur le nombre de contraintes d'espacement à définir, la catégorie de chacune des contraintes d'espacement, le ratio et la capacité maximale des contraintes d'espacement, et les adaptations à réaliser pour respecter l'engagement qui sera conclu à l'issue de la négociation.

5.2.3.1. LIMITATION DU NOMBRE DE CONTRAINTES

La limitation du nombre de contraintes d'espacement est liée à l'architecture du système d'information de l'entreprise. Aujourd'hui, le groupe peut supporter au mieux 30 contraintes d'espacement. Mais, l'objectif visé dans les bonnes pratiques du groupe est de limiter chaque ligne de production à 10 contraintes d'espacement maxi et d'en avoir le moins possible.

5.2.3.2. CATEGORISATION DES CONTRAINTES

La catégorisation d'une contrainte consiste à indiquer si une contrainte doit faire l'objet d'un lissage ou d'un espacement. Le lissage, moins contraignant que l'espacement, peut concerner les contraintes concernant des véhicules faiblement représentés dans les données prévisionnelles. Pour les contraintes espacées, en fonction de l'importance de ces contraintes, leur catégorie peut être négociée (Cf. 2.3.2.3.1). Par conséquent, une contrainte identifiée par le bureau des méthodes peut avoir 5 états : « inactive », « lissée », « mineure », « majeure » et « super-majeure ».

5.2.3.3. CHOIX DES ADAPTATIONS

L'acceptation ou le refus d'un ratio ou d'un volume peut être argumenté à l'aide des informations que nous avons fournies aux équilibreurs. Ces arguments reposent sur le coût des adaptations à réaliser pour parvenir à la flexibilité demandée au montage pour le bureau des méthodes. Et, pour la coordination de production, ils reposent sur les indicateurs suivis les mois précédents et les besoins de la direction commerciale.

5.2.3.4. VERS UN CONTRAT TYPE

De la même façon qu'aujourd'hui (Cf. 2.3.2.3.2), cette réunion de négociation devra se conclure par l'élaboration d'un contrat entre les deux protagonistes. La coordination de production s'engage à respecter à la fois les volumes et les ratios négociés. Le bureau des méthodes s'engage à appliquer les adaptations nécessaires sur la ligne d'assemblage pour absorber les volumes et les ratios négociés.

Aujourd'hui, le contrat rédigé à l'issue de la réunion est propre à chaque site de production comme nous l'avons observé au cours de l'étude terrain. Pour harmoniser cette démarche, nous conseillons un contrat composé de 6 volets :

- **Volet 1 : Les informations générales.** Ces informations sont extraites des données prévisionnelles et de l'équilibrage :
 - Le nombre de jours du mois (A),
 - Le volume mensuel prévisionnel total (B),
 - Le volume moyen quotidien ($C = \left\lfloor \frac{B}{A} \right\rfloor$),
 - Le nombre de postes de travail pris en compte,
 - Le nombre de postes de travail ayant au moins un véhicule provoquant un pic de charge.
- **Volet 2 : La liste des contraintes d'espacement.** Avec la matrice colorée des relations, le bureau des méthodes définit cette liste avec les informations suivantes :
 - Le nom,
 - Le libellé,
 - Le critère.
- **Volet 3 : Les données prévisionnelles.** A partir des données prévisionnelles, la coordination de production calcule pour chacune des contraintes d'espacement les informations suivantes :

- Le volume mensuel (D),
 - La consommation moyenne journalière ($E = \left\lfloor \frac{D}{A} \right\rfloor$),
 - La flexibilité offerte au commerce ($F = \left\lfloor E + 1,5 * \sqrt{2 * E * \left(1 - \frac{E}{C}\right)} \right\rfloor$),
 - La flexibilité demandée au montage ($G = \left\lfloor E + 2,5 * \sqrt{2 * E * \left(1 - \frac{E}{C}\right)} \right\rfloor$),
- **Volet 4 : L'impact sur la ligne d'assemblage.** En fonction de l'équilibrage et des données prévisionnelles, l'équilibreur fournit pour chacune des contraintes d'espacement les informations suivantes :
- Le nombre de postes contraints,
 - Le nombre d'opérateurs concernés par ces postes de travail,
 - L'indicateur de pertinence.
- **Volet 5 : Le résultat de la négociation.** A l'issue de la négociation pour chacune des contraintes d'espacement, les équilibreurs et la coordination de production renseignent :
- La catégorisation,
 - Le ratio N/P négocié,
 - La capacité maximale dynamique ($H = \left\lfloor C * \frac{N}{P} \right\rfloor$),
 - La capacité maximale négociée (I),
 - Les remarques et les adaptations réalisées.
- **Volet 6 : Les indicateurs de performances.** Pour mesurer la performance de la négociation de chacune des contraintes d'espacement, les équilibreurs et la coordination de production calculent les indicateurs suivants :
- L'indicateur de perte ($J = \frac{I-H}{C}$),
 - La flexibilité potentielle totale ($K = \frac{H-E}{H}$),
 - La flexibilité potentielle supplémentaire pour le commerce ($L = \frac{H-F}{H}$),
 - La flexibilité potentielle supplémentaire pour le montage ($M = \frac{H-G}{H}$).

Sur un même document, nous présentons une synthèse des données prévisionnelles, de l'équilibrage de la ligne d'assemblage et de la flexibilité disponible. Les arguments utilisés par les uns et les autres y sont également renseignés pour comprendre le compromis réalisé.

Puis, à l'issue de la négociation, tout comme aujourd'hui, les équilibreur devront procéder aux adaptations négociées et la coordination de production doit préparer les systèmes d'information.

5.2.4. *EVOLUTION DE L'EXECUTION*

Pour le bureau des méthodes, notre démarche n'apporte aucune évolution pendant l'exécution. Par contre, pour la coordination de production, nous leur proposons une procédure quotidienne basée sur l'outil d'aide à l'analyse des interactions de contraintes. Cet outil et le mode d'emploi que nous présentons dans la partie 4.6 leur permettent d'anticiper les risques de non respects des contraintes d'espacement ou d'ajuster les ratios des contraintes d'espacement au programme de production du jour.

5.2.5. *EVOLUTION DE L'ANIMATION*

Comme nous l'avons indiqué en 2.3.2.3.4, la coordination de production peut être amenée à suivre trois indicateurs pour vérifier si les engagements pris lors de la réunion de négociation sont respectés ou pas. Nous rappelons que ces indicateurs sont :

- **Qualité** : nombre de non respects des contraintes d'espacement négociées,
- **Fiabilité** : écart entre la consommation prévisionnelle et la consommation réelle,
- **Lissage** : étude des écarts entre les véhicules soumis à la même contrainte d'espacement.

Nous avons observé que ces indicateurs sont diversement suivis par les différentes coordinations de production que nous avons étudiées (Cf. 2.3.3.). Mais, pour s'assurer du respect constant des engagements de la part de la coordination de production, il est préférable de suivre simultanément et quotidiennement ces 3 indicateurs.

Suite à l'ajustement quotidien des ratios, nous conseillons d'archiver les ratios appliqués quotidiennement pour éventuellement identifier une source d'amélioration potentielle de l'équilibrage. Par exemple, la contrainte d'espacement CJ27O001 a été négociée en Février 2005 à Rennes avec un ratio de 1/10. Mais, si le ratio appliqué quotidiennement est proche de 1/76 comme nous avons pu l'obtenir dans l'exemple précédent, nous pourrions étudier la possibilité de la supprimer ou de la lisser. La disparition

de cette contrainte d'espacement lors de la négociation pourrait permettre au bureau des méthodes de proposer une nouvelle contrainte qui avait été écartée jusque-là.

Pour le bureau des méthodes, nous préconisons le suivi du nombre de non respects, tout comme la coordination de production, et du nombre d'alertes déclenchées par l'application SPELEO. Et, pour mesurer la cohérence entre les non respects des contraintes d'espacement et les alertes déclenchées, c'est-à-dire vérifier que les contraintes d'espacement sont judicieuses et opportunes, nous conseillons de suivre également : le nombre d'alertes sans non respect, le nombre de non respects sans alerte et le nombre de non respects avec une alerte. L'objectif des équilibreur étant d'arriver à minimiser les situations incohérentes comme les alertes sans non respect et les non respects sans alerte.

L'archivage de ces indicateurs pourrait fournir une aide précieuse aux futures décisions.

5.3. CONCLUSION

Pour aider les équilibreurs à identifier les postes de travail nécessitant des adaptations, nous proposons une classification. Cette classification exploite les trois composantes du dimensionnement d'une ligne d'assemblage : l'équilibrage, l'ordonnancement et la flexibilité. L'équilibrage et les données prévisionnelles permettent d'identifier les contraintes d'espacement et leur capacité maximale. L'évaluation de la capacité maximale intègre l'ordonnancement des véhicules. La flexibilité est bornée par deux mesures : indicateur de flexibilité disponible et la flexibilité demandée au montage. La première représente la flexibilité maximale disponible et la deuxième représente la flexibilité minimale à attribuer à la ligne d'assemblage.

Dans ce chapitre, nous avons montré, certes pour une journée de production, le lien qui existe entre cette classification et les opérateurs pouvant être en difficulté sur la ligne d'assemblage. Par conséquent, l'objectif des équilibreurs consiste à minimiser les postes de travail mal dimensionnés. Cela minimisera le nombre d'opérateurs polyvalents nécessaires pour renforcer les postes de travail suite à une mauvaise qualité de séquençement des véhicules et améliorera le climat social en assurant un bon lissage de la charge de travail.

Au cours de l'étude terrain entreprise au début des travaux, nous avons observé que les sites de production appliquaient les 4 étapes du processus de négociation (préparation, négociation, exécution et animation). Mais, les spécificités étaient si nombreuses que chaque usine terminale disposait d'outils très différents et variés. Les évolutions que nous proposons pour le processus de négociation aboutissent à un processus de négociation qui pourra être

intégré aux bonnes pratiques du groupe. En effet, harmoniser ce processus et présenter les outils et les méthodes nécessaires à une bonne connaissance des capacités de production et d'ordonnancement permettra aux usines terminales de mieux maîtriser le dimensionnement des moyens de production et complétera le travail entrepris par le projet APOLO.

Conclusion et Perspectives

Les travaux de cette thèse ont abouti à la description d'une méthode évaluant la flexibilité disponible de l'atelier montage pour l'ordonnancement des véhicules. Cette méthode intégrée au processus de négociation pourra permettre aux équilibreur d'obtenir un équilibrage avec un bon niveau de flexibilité.

Tout d'abord d'un point de vue académique, nos travaux contribuent à enrichir la littérature déjà très abondante sur le problème d'équilibrage d'une ligne d'assemblage à modèles mélangés, sur le problème de séquençement des véhicules et sur la flexibilité des entreprises manufacturières. Un apport essentiel de notre travail a consisté à montrer les liens réciproques entre l'équilibrage d'une ligne d'assemblage à modèles mélangés et l'ordonnancement de produits. Les incertitudes et les variations existant dans les données prévisionnelles utilisées pour équilibrer une ligne d'assemblage nécessitent la prise en compte d'une certaine flexibilité pour lisser la charge de travail des opérateurs.

En considérant la modélisation d'un opérateur en difficulté, nous avons mis en évidence une nouvelle approche du problème d'ordonnancement d'une ligne de montage. Ce problème a été étudié dans le cadre d'un premier travail (El Hadj Khalaf, 2006). Nous avons aussi proposé une formalisation de la définition des contraintes d'espacement. Dans ce cadre, la matrice des relations du chapitre 3 contribue à décrire précisément les relations existantes entre une contrainte d'espacement et les postes de travail d'une ligne d'assemblage à modèles mélangés.

Puis, nous avons caractérisé et modélisé un nouveau phénomène qui perturbe le respect des contraintes d'espacement : les interactions de contraintes. Nous avons démontré 3 propriétés théoriques caractérisant des cas pour lesquels il n'y a pas d'interactions entre 2 contraintes ; nous avons aussi développé une approche pragmatique pour aborder ce problème sur des cas réels. Cette modélisation permet d'anticiper les difficultés de séquençement et permet d'identifier précisément les contraintes d'espacement qu'il faut adapter pour faciliter le lissage de la charge de travail des opérateurs.

Enfin, les indicateurs de mesure de pertes de performance de l'équilibrage et les indicateurs de mesure de la flexibilité potentielle supplémentaire évaluent simultanément la qualité de l'équilibrage et la capacité des outils d'ordonnancement à lisser la charge de travail

des opérateurs. Ces indicateurs offrent la possibilité de classer simplement les postes de travail par ordre de priorité d'adaptation.

Dans un deuxième temps, nos travaux contribuent à harmoniser les modes de fonctionnement des usines terminales. Pour l'usine terminale, nous avons mis en évidence un mode de fonctionnement commun : « le processus de négociation des contraintes ». L'utilisation de ce processus et les méthodes employées pour évaluer la flexibilité varient en fonction des expériences menées sur chacun des sites étudiés. Globalement, sans trop bousculer les habitudes, nous proposons quelques évolutions des rôles et des méthodes qui aboutissent à un fonctionnement homogène, valorisable et généralisable. L'analyse statistique sur les données prévisionnelles a démystifié le manque de fiabilité et a permis de renforcer la gestion actuelle des volumes. Depuis le début de l'année 2006, la direction commerciale a décidé de réduire les variations commerciales dans la limite de la flexibilité qui lui est offerte pour encore augmenter cette fiabilité.

Pour le bureau des méthodes, l'analyse de la qualité de l'ordonnancement a montré que l'absence d'une méthode pour définir les contraintes d'espacement est responsable des incohérences observées. La méthode que nous avons présentée dans le chapitre 3 a été longuement abordée avec les différents services. Mais, actuellement, les systèmes d'information ne permettent pas d'intégrer immédiatement la méthode préconisée. En relation avec les équipes informatiques et les utilisateurs, nous avons étudié la possibilité d'intégrer nos travaux dans ces systèmes. La modélisation d'un opérateur en difficulté correspondant au mode de fonctionnement de l'atelier montage va être malheureusement abandonnée car l'application SPELEO est définitivement arrêtée car elle n'a pas prouvé son efficacité. Néanmoins, concernant la définition d'une contrainte d'espacement et la mesure de la flexibilité de l'atelier, l'outil d'équilibrage des lignes d'assemblage va évoluer pour proposer, d'ici Janvier 2007, la matrice colorée des relations, la définition des ratios et la classification des postes de travail. Ces évolutions permettront au bureau des méthodes d'avoir une meilleure visibilité de l'impact de l'équilibrage sur l'ordonnancement des véhicules.

Pour la coordination de production, l'étude des interactions de contraintes a contribué à la clarification de cette notion. Les propriétés, la conjecture et la modélisation que nous avons développées ont été présentées aux responsables de l'ordonnancement. Cela a changé leur compréhension du phénomène et sa gestion. L'outil d'aide à l'analyse des interactions de

contrainte va leur permettre de mieux appréhender l'impact des interactions de contraintes d'espacement prises deux à deux sur l'ordonnement des véhicules. Cet outil sera disponible à la fin de l'année 2006.

Enfin, nos travaux ouvrent de nouvelles perspectives. Aujourd'hui, le choix des critères des contraintes d'espacement reste à la discrétion des équilibreur. Comme l'objectif de ces contraintes est de représenter le plus possible les véhicules provoquant un pic de charge sur un ou plusieurs postes de travail, nous pouvons envisager l'étude d'un outil automatique permettant de les identifier.

Les préconisations que nous faisons sur l'équilibrage des charges de travail des opérateurs lorsqu'un poste de travail possède un véhicule avec un pic de charge conduisent à proposer de nouvelles contraintes pour le problème généralisé de l'équilibrage d'une ligne d'assemblage (GALBP). En effet, la contrainte du temps cycle pourrait être assouplie à condition que l'ordonnement des véhicules puisse espacer suffisamment ces véhicules pour permettre aux opérateurs de réaliser leur travail sans être en difficulté. Cette nouvelle condition peut constituer une nouvelle approche du problème d'équilibrage d'une ligne d'assemblage à modèles mélangés.

Et, afin de réduire la marge de sécurisation et de proposer une flexibilité éventuellement juste nécessaire à chacune des contraintes d'espacement, nous pourrions étudier l'analyse des interactions de contraintes dès la phase de préparation. En effet, la bonne fiabilité des données prévisionnelles ouvre la possibilité d'exploiter les descriptions détaillées pour construire des films de production prévisionnels (un par scénario imaginable). Un film de production prévisionnel serait un programme de production quotidien type issu des données prévisionnelles. Ces films de production prévisionnels, qui intégreraient des variations de volumes ou des aléas de production, permettraient de mieux prendre en compte les interactions de contraintes et d'étudier la robustesse d'un équilibrage.

Bibliographie

- 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
- Becker C., Scholl A. 2006**, « *A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing* », European Journal Of Operational Research 168 (2006) ,694-715
- Bernier, V., 2000**, « *Sur une nouvelle politique de gestion de flux : le cadencement reséquençable* », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, soutenue le 17/11/2000
- Billaut J.C, Moukrim A., Sanlaville E, 2005**, « *Flexibilité et robustesse en ordonnancement* », Hermes science, ISBN 2-7462-1028-2
- Bollon, J.M., 2001**, « *Etude de différentes politiques de pilotage de systèmes de production* », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, soutenue le 11/05/2001
- 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.
- Boutevin, C., Gourgand M., Norre S., 2003**, « *Méthodes d'optimisation pour le problème de l'équilibrage de ligne d'assemblage* », Acte de la 4° Conférence Francophone de Modélisation et Simulation, MOSIM'03, 23-25 Avril 2003, Toulouse
- Comby G., 1996**, « *Aide au séquençement des produits sur une ligne de fabrication multi modèles* ». Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, soutenue le 19/12/1996
- 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

- Delaval, M., 1997**, « *Séquencement des lignes d'assemblage à modèles mélangés* », Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologie de Lille, Soutenue le 30/10/1997
- Dincbas M, Simonis H, Van Hentenryck P, 1988**, « *Solving the Car-Sequencing Problem in Constraint Logic Programming* », ECRC Munich, European Conference on AI.
- Dolgui, A., Proth, J-M., 2006**, « *Les systèmes de production modernes* », Hermes Science, Lavoisier, Volume 1, ISBN 2-7462-1249-8, et Volume 2, ISBN 2-7462-1250-1
- El Hadj Khalaf, R., 2006**, « *Problème du séquencement des véhicules : ajout d'un nouveau critère* », Master Recherche, Management Stratégique et Génie des Organisation, Institut National Polytechnique, Grenoble
- 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
- Felix, R., 1994**, « *Relationships between goals in multiple attribute decision making* », Fuzzy Sets and Systems, n°67, p47-52
- Ferioli, M., 2006**, « *Mesure de la flexibilité de l'atelier montage* », Master Recherche, Management Stratégique et Génie des Organisation, Institut National Polytechnique, Grenoble
- Gent, I.P, 1998**, « *Two results on car sequencing problem* », Report APES-02-1998
- 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
- Giraud-David, I., 1992**, « *Principes et critères d'évaluation d'un ordonnancement pour une ligne de montage* », rapport de stage de Ecole Nationale Supérieure des Postes et Télécommunication, Juillet 1992
- Gourgand M., Grangeon N, Leclaire P, Norre S., 2006**, « *Le problème du rééquilibrage d'une ligne d'assemblage de véhicules* », Acte de la 6^{ème} Conférence Francophone de Modélisation et Simulation, MOSIM'06, 3-5 Avril 2006, Rabat (Maroc)

- Guerre-Chaley F., 1995**, « *Sur les séquencements en unité de production automobile* », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, soutenue le 13/12/95
- Gupta, A., 2004**, « *Approach to Characterize Manufacturing Flexibility* », 2nd world conference on Productions and Operations Management (POM), 15th annual Conférence, Cancun, Mexico, 30/04 – 03/05/2004
- Hodgson, J., 1994**, « *Thinking on Your Feet in Negotiations* », Pitman, London.
- 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* », Revue Koréenne, p300-303, 27/04/2001
- Kochan A, 2003**, « *BMW gives customer orders top priority and brings in fuzzy logic to help* », World Automotive Manufacturing n°57, Mars 2003, p12-15
- Leclaire, P., 2005**, « *Logiciel d'aide à la décision pour l'équilibrage de la charge d'une ligne de montage de véhicules* », Master, Université Clermont-Ferrand
- Lesert, A., 2003**, « *Aide au paramétrage d'un pilotage réactif appliqué à un flux véhicule d'une usine terminale* », Rapport de DEA Intelligence Artificielle et Optimisation Combinatoire, Université Paris VIII, Paris
- Lesert A., Alpan G., Frein Y., Noiré S., Vienot F.R., 2005**, « *Influence des interactions de contraintes sur l'ordonnancement d'une ligne de montage – Le cas de deux contraintes* », 6^{ème} Congrès international de génie industriel, GI'2005, 7-10 Juin 2005, Besançon
- 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)

- Miltenburg, J., 1989**, « *Level schedule for mixed-model multi-level just-in-time production systems* », *Management Science* n°32, p192-207
- Monden, 1983**, « *Toyota production system* », Industrial Engineering and Management Press, Institute of Industrial Engineers, Atlanta, GA, USA
- Nguyen, A., Cung V-D, 2005**, « *Le problème du Car Sequencing RENAULT et le challenge ROADEF'2005* », Actes JFPC 2005
- Okamura, K., Yamashina, H., 1979**, « *A heuristic algorithm for the assembly line model-mix sequencing problem to minimize the risk of stopping the conveyor* », *International Journal of Production Research*, vol 17, n°3, p233-247
- 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
- Parker, R., Wirth, A., 1999**, « *Manufacturing flexibility : measures and relationships* », *European Journal of Operational Research*, 118, p429-449
- Rachamadugu, R., Yano, C.A., 1989**, « *Analytical tools for assembly line design and sequencing* », Technical Report 89-28, The University of Michigan, Septembre 1989
- Rekiek B., 2001**, « *Assembly Line Design* », Thèse de doctorat en Sciences Appliquées, Université libre de Bruxelles
- 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, p666-693
- Shingo S., 1988**, « *Maîtrise de la production et méthode Kanban, le cas Toyota* ». Editions d'organisation, Paris, 243p, ISBN : 2-7081-0556-6
- Solnon C., Van-Dat C., Nguyen A., Artigues C., 2006**, « *The car sequencing problem : overview of state-of-the-art methods and industrial case-study of the ROADEF'2005 challenge problem* », Rapport du Laboratoire Informatique d'Avignon

- Sumichrast R. T., Russel R.S., Taylor B.W., 1992**, « *A comparative analysis of sequencing procedures for mixed-model assembly lines in a just-in-time production system* », International Journal of Production Research, vol. 30, p199-214
- Taylor, F., 1911**, « *The Principles of Scientific Management* », M.E., Sc. D.
- Thomas C., 2003**, « *Analyse de la flexibilité : le cas d'une unité de production d'aluminium* », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, soutenue le 19/12/2003
- Thomas C, Penz B., 2002**, « *Définition, classification et mesure de la flexibilité manufacturière : difficultés et contradictions* », Colloque IPI, Autrans
- Thomas, S., 2005**, « *Evaluation des coûts de surcapacité de production d'une usine terminale automobile* », Master Recherche, Management Stratégique et Génie des Organisation, Institut National Polytechnique de Grenoble
- Thomopoulos, N., 1967**, « *Line balancing-sequencing for mixed-model assembly* », Management Science, Vol n°14, n°2, p59-75
- Tsai, L., 1992**, « *Mixed-model sequencing to minimize utility work and the risk of conveyor stoppage* », Management Science, vol n°41, p485-495
- Vienot, F.R, 2004**, « *Etude de l'influence des interactions de contraintes sur la flexibilité juste nécessaire au montage d'une usine terminale automobile* », Rapport de projet de fin d'Etude, Institut National Polytechnique, Grenoble
- 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
- Yano, C.A., Rachamadugu, R., 1991**, « *Sequencing to minimize work overload in assembly lines with product options* », Management science, Vol n°37, n°5, p572-586

Annexes

ANNEXE A - INDICATEUR DE NON RESPECTS D'UNE CONTRAINTE D'ESPACEMENT

Dans la partie 3.3.4. *Indicateur de non respects d'une contrainte d'espacement*, nous avons présenté l'indicateur utilisé par PSA Peugeot Citroën. Avant de choisir cet indicateur, nous décrirons et nous comparerons les indicateurs d'espacement utilisés par Renault et par PSA Peugeot Citroën dans cette annexe. Puis, nous argumenterons le choix de l'indicateur d'espacement PSA Peugeot Citroën en comparant les non respects aux alertes.

INDICATEUR D'ESPACEMENT RENAULT

Nguyen et al (2005) présentent l'indicateur d'espacement utilisé par Renault, $I_{esp-Renault_i}$ (équation A.1). Cet indicateur consiste à écarter le plus possible les véhicules lorsque la contrainte d'espacement ne peut pas être respectée. Plus deux véhicules soumis à la même contrainte d'espacement sont proches, plus cet indicateur aura une valeur élevée.

$$I_{esp-Renault_i} = \sum_{j=-P_i}^{Q_{tot}+P_i} \max \left(-N_i + \sum_{k=j-P_i+1}^j x_{k,i}, 0 \right) \quad (A.1)$$

Q_{tot} , le nombre de véhicules dans la séquence,

N_i/P_i , le ratio de la contrainte d'espacement i ,

$x_{j,i} = 1$ si le véhicule à la position j est soumis à la contrainte d'espacement i , 0 sinon.

La figure A-1 illustre le calcul de l'indicateur d'espacement Renault pour une contrainte d'espacement sur les véhicules haut de gamme avec un ratio 1/5 ($I_{esp-Renault_i} = 5$).

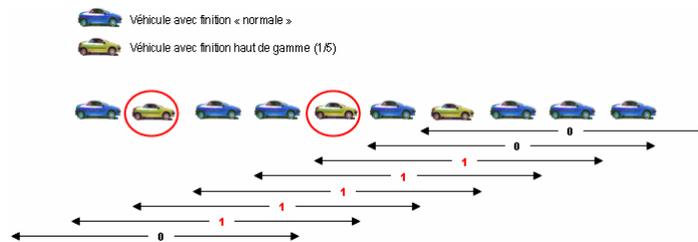


Figure A-1 : Exemple d'application de l'indicateur d'espacement Renault

INDICATEUR D'ESPACEMENT PSA

Joly (2005) présente l'indicateur d'espacement utilisé par PSA Peugeot Citroën, $I_{esp-PSA_i}$. Il compte le nombre de véhicules ne respectant pas la contrainte d'espacement (équation A.2).

$$I_{esp-PSA_i} = \sum_{j=1}^{Q_{tot}} \left(x_{j,i} * \min \left(\max \left(-N_i + \sum_{k=j-P_i+1}^j x_{k,i}, 0 \right), 1 \right) \right) \quad (A.2)$$

Q_{tot} , le nombre de véhicules dans la séquence,

N_i/P_i , le ratio de la contrainte d'espace i ,

$x_{j,i} = 1$ si le véhicule à la position j est soumis à la contrainte d'espace i , 0 sinon.

La figure A-2 illustre le calcul de l'indicateur d'espace PSA pour une contrainte d'espace sur les véhicules haut de gamme avec un ratio 1/5 ($I_{esp-PSA_i} = 2$).

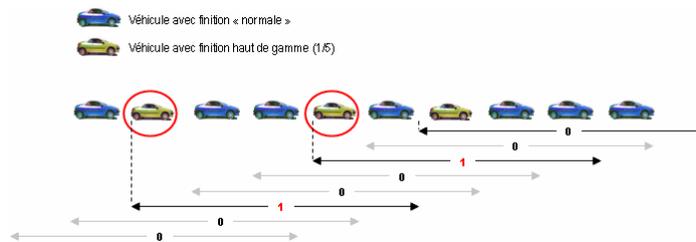


Figure A-2 : Exemple d'application de l'indicateur d'espace PSA

COMPARAISON DES INDICATEURS D'ESPACEMENT

Le tableau A-1 compare la valeur de ces indicateurs d'espace pour 5 séquences différentes. Chaque séquence compte 14 véhicules, dont 2 seulement sont soumis à une contrainte d'espace (ceux notés par « X »). Ce tableau montre que l'indicateur d'espace Renault a une valeur qui croît avec le rapprochement des deux véhicules contrairement à l'indicateur d'espace PSA Peugeot Citroën.

Séquence (1/5)	$I_{esp-Renault_i}$	$I_{esp-PSA_i}$
==== X X =====	0	0
==== X X =====	1	1
==== X X =====	2	1
==== X X =====	3	1
==== XX =====	4	1

Tableau A-1 : Comparaison de la valeur des indicateurs d'espace Renault Vs PSA

L'optimisation d'une séquence de véhicules selon les deux indicateurs décrits précédemment peut donc conduire à des résultats différents. La figure A-3 illustre cette différence avec une séquence de 13 véhicules, dont 4 sont soumis à une contrainte d'espace avec un ratio 1/5. La séquence de gauche est celle obtenue avec l'indicateur d'espace Renault ; les véhicules sont écartés au maximum, mais 3 véhicules ne respectent pas le ratio de la contrainte d'espace et seulement 2 déclenchent une alerte.

Celle de droite est obtenue avec l'indicateur d'espacement PSA ; l'écartement n'est pas homogène mais un seul véhicule ne respecte pas la contrainte d'espacement et déclenche l'alerte.

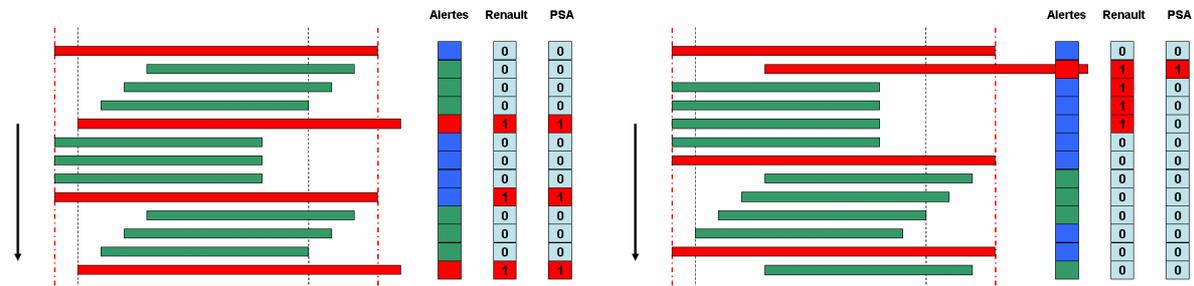


Figure A-3 : Comparaison des indicateurs Renault, PSA et des alertes

Les deux indicateurs d'espacement sont imparfaits. Sur la séquence de gauche, les indicateurs d'espacement comptent un non respect sur le 3^{ème} véhicule rouge, alors qu'il ne déclenche pas d'alertes. Et, sur la séquence de droite, l'indicateur d'espacement de Renault compte 4 non respects alors qu'une seule alerte est déclenchée.

Par conséquent, nous choisissons l'indicateur d'espacement PSA (équation A-1) car il représente mieux le fait qu'un opérateur soit en difficulté (séquence de droite).

ANNEXE B - MODELE ANALYTIQUE DE LA STRATEGIE PPME

Dans la partie 4.2.2. *L'indicateur de difficulté à respecter deux ratios*, nous avons présenté succinctement les différentes approches que nous avons étudié pour estimer la difficulté à respecter simultanément deux contraintes d'espace. Dans cette annexe, nous présentons le modèle mathématique que nous avons obtenu sous certaines conditions. Ce modèle s'inspire du premier modèle que nous avons présenté (Lesert et al., 2005).

Ce modèle s'applique aux contraintes d'espace de la forme $1/P_A$ et $1/P_B$, *i.e.* $N_A=1$ et $N_B=1$ qui ne répondent pas aux 3 propriétés de la partie 4.4.1. *Propriétés* qui caractérisent l'absence de non respect et sous les hypothèses $P_A \leq \left\lfloor \frac{Q_{tot}}{Q_A} \right\rfloor$ et $P_B \leq \left\lfloor \frac{Q_{tot}}{Q_B} \right\rfloor$. Il se décompose en deux approches dépendant du nombre de véhicules ayant simultanément les deux options : soit $q_{AB} > Q_{ind}^+$ avec $Q_{ind}^+ = \left\lfloor \frac{Q_{tot}}{L_{motif}} \right\rfloor$ ou soit $q_{AB} < Q_{ind}^-$ avec $Q_{ind}^- = \left\lfloor \frac{Q_{tot}}{L_{motif}} \right\rfloor$.

PREMIER CAS : $q_{AB} > Q_{ind}^+$

Dans ce cas, le nombre de véhicules ayant les deux options dans le programme de production réel excèdent le nombre de véhicules ayant les deux options dans la liste idéale. Pour cela, nous exploitons la construction d'une séquence de véhicules avec une succession de motifs caractéristiques dont il est facile d'évaluer le nombre de non respects. L'évaluation du nombre de non respects repose sur le dénombrement de chacun de ces motifs. Nous avons, pour cela, identifié 5 motifs caractéristiques :

- **Motif saturé sans non respect** : motif ne comptant que des véhicules ayant les options A et B simultanément telles que les options B soient espacés au pas de l'option A. Ce motif est enchaîné tant que l'écart entre le nombre d'options B dans le programme de production et le nombre d'options B induit par le ratio le permet.
- **Motif saturé de transition** : motif intermédiaire entre le motif saturé sans non respect et le motif saturé avec non respects. Dans la séquence, ce motif apparaît au plus une seule fois.
- **Motif saturé avec non respect** : motif comptant soit des véhicules ayant les deux options simultanément, soit des véhicules ayant uniquement l'option B. Ce motif est enchaîné tant que le nombre de véhicules devant avoir les deux options simultanément dans le programme de production n'est pas atteint.

- **Un motif de transition** : motif intermédiaire entre le motif saturé avec non respect et le motif élémentaire. Dans la séquence ce motif apparaît au plus une seule fois.
- **Un motif élémentaire** : Ce motif est décrit dans la partie 4.3.7. *Motif élémentaire, liste idéale et ensemble des listes idéales*. La particularité de ce motif est de compter un seul véhicule avec les deux options simultanément.

A l'exception du motif de transition, tous les motifs ont une longueur égale à la longueur d'un motif élémentaire, $L_{motif} = PPCM(P_A, P_B)$. De plus, le motif saturé sans non respect et le motif élémentaire ne provoquent pas de non respects.

Le dénombrement des motifs est réalisé en comparant le programme de production saturé possédant des quantités correspondantes aux quantités induites par les ratios, $P_{saturé}(q_0, q_A, q_B, q_{AB}, 1/P_A, 1/P_B)$, et le programme de production réel, $P_{réel}(q'_0, q'_A, q'_B, q_{AB}, 1/P_A, 1/P_B)$.

$q_0 = Q_{tot} - \left\lfloor \frac{Q_{tot}}{P_A} \right\rfloor - \left\lfloor \frac{Q_{tot}}{P_B} \right\rfloor + q_{AB}$	Nombre de véhicules sans option dans le programme de production saturé
$q_A = \left\lfloor \frac{Q_{tot}}{P_A} \right\rfloor - q_{AB}$	Nombre de véhicules ayant l'option A seule dans le programme de production saturé
$q_B = \left\lfloor \frac{Q_{tot}}{P_B} \right\rfloor - q_{AB}$	Nombre de véhicules ayant l'option B seule dans le programme de production saturé
$Q_{tot} = q_0 + q_A + q_B + q_{AB}$	Nombre de véhicules total présent dans le programme de production
$Q'_{tot} = q'_0 + q'_A + q'_B + q_{AB}$	
$Q'_A = q'_A + q_{AB}$	Nombre de véhicules ayant au moins l'option A dans le programme de production réel
$Q'_B = q'_B + q_{AB}$	Nombre de véhicules ayant au moins l'option B dans le programme de production réel
$Q_A = q_A + q_{AB}$	Nombre de véhicules ayant au moins l'option A dans le programme de production saturé
$Q_B = q_B + q_{AB}$	Nombre de véhicules ayant au moins l'option B dans le programme de production saturé
$L_{motif} = PPCM(P_A, P_B)$	Longueur du motif élémentaire

$$Q_{ind}^- = \left\lfloor \frac{Q_{tot}}{L_{motif}} \right\rfloor \text{ et } Q_{ind}^+ = \left\lceil \frac{Q_{tot}}{L_{motif}} \right\rceil$$

Nombre idéal de véhicules ayant les options A et B simultanément

$$L_A = \frac{P_B}{PGCD(P_A, P_B)}$$

Nombre de véhicules ayant au moins l'option A dans un motif élémentaire

$$L_B = \frac{P_A}{PGCD(P_A, P_B)}$$

Nombre de véhicules ayant au moins l'option B dans un motif élémentaire

$$m = \left\lfloor \frac{q_{AB} - Q_{ind}^+}{L_A - 1} \right\rfloor$$

Nombre de motifs saturés

$$m'' = \left\lfloor \frac{q_A}{L_A - 1} \right\rfloor$$

Nombre de motifs élémentaires dans la séquence du programme de production saturé

$$s = \left\lfloor \frac{q_B - q'_B}{L_B - L_A} \right\rfloor$$

Nombre de motifs pouvant avoir toutes les options B espacées de $P_A - 1$

$$s' = \left\lfloor \frac{q_B - q'_B}{L_B - L_A} \right\rfloor$$

Nombre de motifs pouvant avoir des options B espacées de $P_A - 1$

$$\alpha = \left\lceil \frac{P_A}{P_B} \right\rceil$$

$\alpha * P_B$ correspond à la distance minimale entre deux véhicules ayant les options A et B simultanément (sans déplacement de B) permettant d'éviter un non respect de la contrainte sur A

A partir du schéma décrit pour construire la séquence, nous pouvons évaluer le nombre de motifs construits pour chacune des étapes décrites ci-dessus :

$$m_1 = \text{Min}(m, s)$$

Nombre de motifs saturés sans non respect

$$m_2 = \text{Min}(m, s') - \text{Min}(m, s)$$

Nombre de motifs saturés de transition

$$m_3 = m - \text{Min}(m, s')$$

Nombre de motifs saturés avec non respects

$$m_4 = 1$$

Nombre de motifs de transition

$$m_5 = m''$$

Nombre de motifs élémentaires

Les valeurs suivantes sont évaluées pour le motif saturé de transition :

$L'_B = L_A +$ $Max((q_B - q'_B) - s * (L_B - L_A), 0)$	Nombre de véhicules ayant au moins l'option B dans un motif saturé de transition
$n' = \left\lfloor \frac{L_{motif} - L'_B * P_B}{P_A - P_B} \right\rfloor$	Nombre de véhicules ayant au moins l'option B espacés de $P_A - 1$ dans un motif saturé de transition
$x' = \left\lfloor \frac{1}{\alpha - 1} \left(L_B - n' * \frac{P_A}{P_B} - L_A + n' \right) \right\rfloor$	Nombre de véhicules ayant les options A et B simultanément espacés de $\alpha * P_B - 1$ dans un motif saturé de transition

Les valeurs suivantes sont évaluées pour le motif de transition :

$R_{motif} = Q_{tot} - (m + m') * L_{motif}$	Longueur du motif de transition
$r_A = q_A - m'' * (L_A - 1)$	Nombre de véhicules ayant l'option A seule dans un motif de transition
$r_B = q_B - [m * (L_B - L_A) + m'' * (L_B - 1)]$	Nombre de véhicules ayant l'option B seule dans un motif de transition du programme de production saturé
$r_{AB} = q_{AB} - (m * L_A + m')$	Nombre de véhicules ayant les options A et B simultanément dans un motif de transition
$R_A = r_A + r_{AB}$	Nombre de véhicules ayant au moins l'option A dans un motif de transition
$r'_{AB} = Max(r_{AB} - 1, 0)$	Nombre de véhicules ayant les options A et B simultanément dans un motif de transition sans le premier véhicule espacé d'au plus $P_A - 1$
$r'_B = Max(0, r_B - Max(0, (q_B - q'_B) - m * (L_B - L_A)))$	Nombre de véhicules ayant l'option B seule dans un motif de transition du programme de production réel
$L''_B = r'_B + r_{AB}$	Nombre de véhicules ayant au moins l'option B dans un motif de transition
$n'' = Min\left(\left\lfloor \frac{R_{motif} - L''_B * P_B}{P_A - P_B} \right\rfloor, r'_{AB}\right)$	Nombre de véhicules ayant les options A et B simultanément espacés de $P_A - 1$ dans un motif de transition
$r'_{max_{AB}} = \left\lfloor \frac{R_{motif} - n'' * (P_A - P_B) - R_A * P_B}{P_B * (\alpha - 1)} \right\rfloor$	Nombre de véhicules ayant les options A et B simultanément espacés de $\alpha * P_B - 1$ dans un motif de transition
$\beta'_1 = Min(r'_{AB} - n'', r'_{max_{AB}})$	Nombre de véhicules ayant les options A et B simultanément espacés de $\alpha * P_B - 1$ dans un motif de transition
$\beta'_2 = r'_{AB} - n'' - \beta'_1$	Nombre de véhicules ayant les options A et B simultanément espacés de $P_B - 1$ dans un motif de transition

$$\gamma'_1 = \text{Min} \left(\left[\frac{R_{\text{motif}} - n'' * P_A - \beta'_1 * \alpha * P_B - \beta'_2 * P_B - R_A + r'_{AB}}{P_A - 1} \right], R_A - r'_{AB} \right)$$

Nombre de véhicules ayant l'option A seule
espacés de $P_A - 1$ dans un motif de transition

$$\gamma'_2 = R_A - r'_{AB} - \gamma'_1$$

Nombre de véhicules ayant l'option A seule espacés de
moins de $P_A - 1$ dans un motif de transition

DEUXIEME CAS : $q_{AB} < Q_{ind}^-$

Dans ce cas, le nombre de véhicules ayant les deux options dans le programme de production réel est inférieur au nombre de véhicules ayant les deux options dans la liste idéale. Pour cela, il suffit d'enlever des véhicules ayant les deux options simultanément ou une des deux seulement.

$$V_{p1} = \text{Min}(q_A - q'_A, q_B - q'_B) * P_B$$

Nombre de non respects en moins dans le cas d'une
absence simultanée d'une option A et d'une option B

$$V_{p2} = (q_A - q'_A) - \text{Min}(q_A - q'_A, q_B - q'_B)$$

Nombre de non respects en moins dans le cas d'une
absence d'une option A

$$V_{p3} = (q_B - q'_B) - \text{Min}(q_A - q'_A, q_B - q'_B)$$

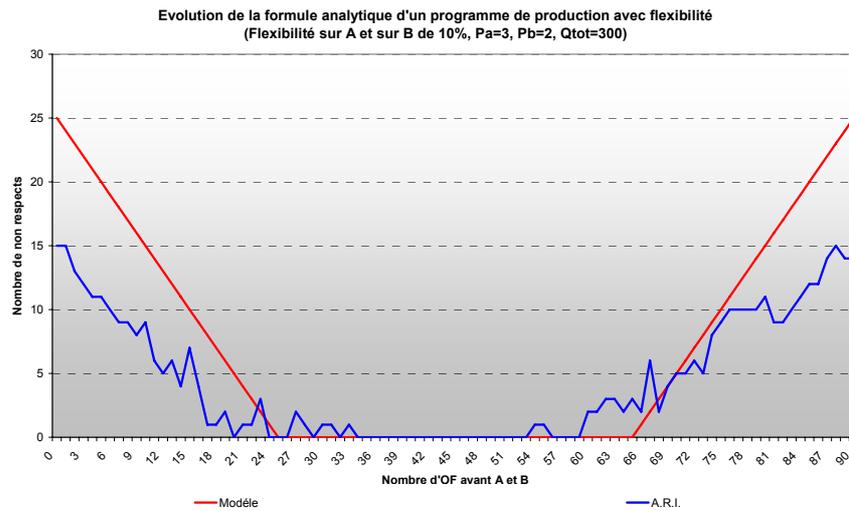
Nombre de non respects en moins dans le cas d'une
absence d'une option B

MODELE MATHEMATIQUE PROPOSE

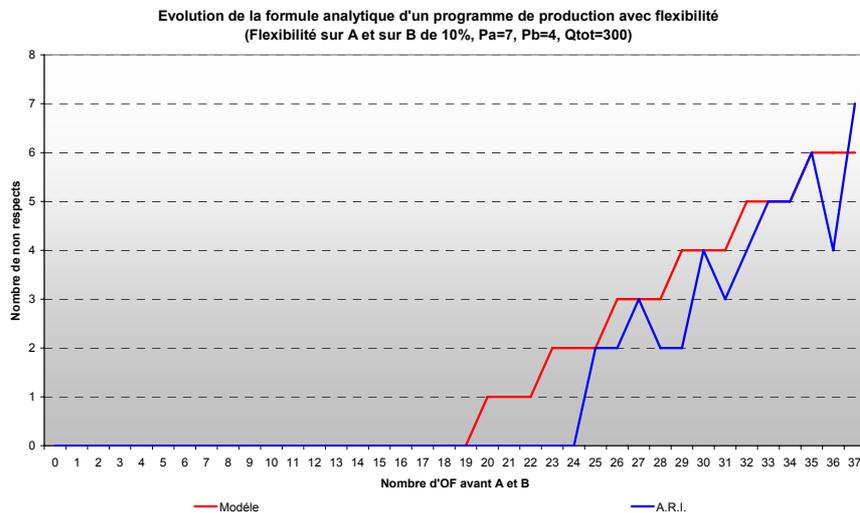
$$I_{f\text{ esp}} = \begin{cases} \text{Max}(Q_{ind}^- - q_{AB} - (V_{p1} + V_{p2} + V_{p3}), 0) & \text{si } q_{AB} < Q_{ind}^- \\ m_2 * (L_A - x' - n') + m_3 * \left(L_A - \left[\frac{L_B - L_A}{\alpha - 1} \right] \right) + (\beta'_2 + \gamma'_2) & \text{si } q_{AB} > Q_{ind}^+ \end{cases} \quad (\text{B.1})$$

RESULTATS NUMERIQUES

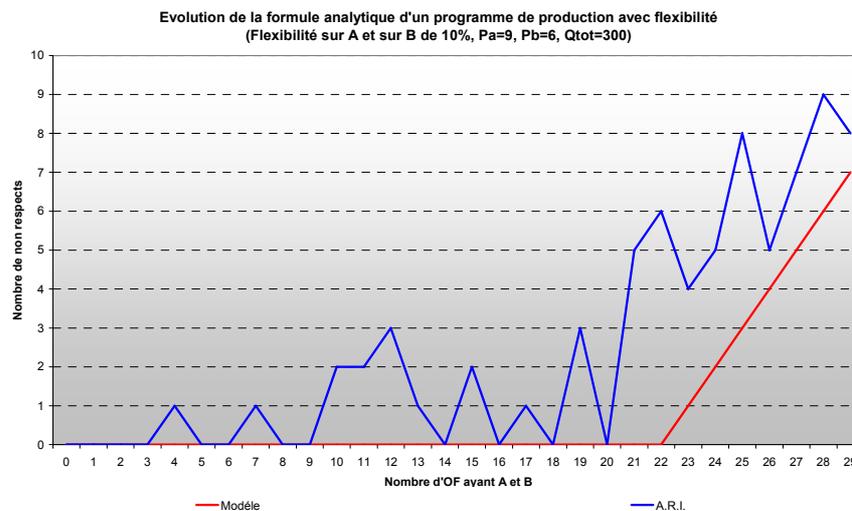
Ce modèle mathématique a été confronté à l'un outil de séquençement du groupe PSA Peugeot Citroën. Nous constatons que les valeurs des solutions obtenues sont proches comme l'illustre la figure B-1. La figure B-1 présente les résultats de trois cas. En abscisse, nous faisons varier le nombre de véhicules soumis aux deux contraintes simultanément (q_{AB} varie de 0 à la quantité de véhicules possédant l'option la moins représentée) en sachant que le nombre total de véhicules et le nombre de véhicules possédant au moins la première et la deuxième contrainte sont constants (Q_{tot} , Q_A et Q_B sont constants). En ordonnée, nous trouvons la valeur de la formule analytique, $I_{f\text{ esp}}$, (trait rouge) et la valeur obtenue avec l'outil de séquençement du groupe PSA Peugeot Citroën, ARI, (trait bleu), I_{esp} .



1) A en 1/3, B en 1/2, $Q_A = 90$, $Q_B = 135$ et $Q_{tot} = 300$



2) A en 1/7, B en 1/4, $Q_A = 37$, $Q_B = 68$ et $Q_{tot} = 300$



3) A en 1/9, B en 1/6, $Q_A = 29$, $Q_B = 45$ et $Q_{tot} = 300$

Figure B-1 : Comparaison du modèle mathématique et de l'outil de séquençement PSA

ANNEXE C - DEMONSTRATION DES PROPRIETES DE L'ABSENCE DE NON RESPECTS

Dans la partie 4.4.1. *Propriétés* de la modélisation des interactions de contraintes, nous avons énoncé 3 propriétés caractérisant l'absence de non respects, sous la condition $N_A = 1$ et $N_B = 1$. Dans cette partie, nous allons les démontrer par construction. Ces démonstrations s'appuient sur la démonstration en annexe D qu'un motif élémentaire compte au plus un véhicule ayant les deux options.

Posons $P_A \geq P_B$.

Propriété 1. Si P_A et P_B sont multiples, il existe un séquençement respectant simultanément les deux contraintes de ratio $1/P_A$ et $1/P_B$.

Comme P_A et P_B sont multiples, $L_{motif} = PPCM(P_A, P_B) = P_A$.

Dans un premier temps, nous allons poser les hypothèses suivantes :

H.1. : La quantité de véhicules à séquencer, Q_{tot} , est multiple de la longueur d'un motif élémentaire, L_{motif} .

H.2. : Le nombre de véhicules ayant l'option A et le nombre de véhicules ayant l'option B correspond exactement au respect du ratio, *i.e.* $Q_A = \frac{1}{P_A} * Q_{tot}$ et $Q_B = \frac{1}{P_B} * Q_{tot}$.

Un motif élémentaire, pour P_A et P_B multiples, compte au plus un véhicule avec les deux options simultanément. Un motif élémentaire est de la longueur du pas de l'option A. Sous les hypothèses H1 et H2, nous pouvons décomposer notre séquence en deux sous listes idéales : une première composée de q_{AB} motifs élémentaires avec un véhicule ayant les deux options simultanément et une deuxième composée de q_A motifs élémentaires sans véhicules ayant les deux options simultanément, comme l'illustre la figure C-1.

De plus, il existe toujours une juxtaposition de ces deux sous listes qui ne génère pas de non respects, sous la condition que les véhicules qui précèdent ou qui succèdent la séquence à créer n'aient aucune option. Cette construction consiste à créer un motif élémentaire commençant par un véhicule ayant les deux options (pour le premier motif élémentaire) et un motif élémentaire commençant par un véhicule ayant l'option B seule suivi d'un véhicule ayant l'option A (pour le deuxième motif élémentaire). Le décalage, ainsi défini, ne provoque aucune violation car l'écart entre deux options A à la jointure est égal à $P_A + 1$ et l'écart entre deux options B à la jointure est égal à P_B .



Figure C-1 : Séquence respectant les contraintes d'espace multiples (B, 1/2 et A, 1/4)

Dans un deuxième temps, nous allons alléger l'hypothèse H1 en considérant que la quantité de véhicules à séquencer, Q_{tot} , peut ne plus être multiple de la longueur d'un motif élémentaire, L_{motif} . Cela implique une modification de l'hypothèse H2 comme suit :

H'.2. : Le nombre de véhicules ayant l'option A et le nombre de véhicules ayant l'option B correspond au maximum du respect de leur ratio, *i.e.* $Q_A = \left\lfloor \frac{1}{P_A} * Q_{tot} \right\rfloor$ et $Q_B = \left\lfloor \frac{1}{P_B} * Q_{tot} \right\rfloor$.

Cette modification consiste à considérer qu'une séquence est composée par $\left\lfloor \frac{Q_{tot}}{L_{motif}} \right\rfloor$ motifs élémentaires et par un motif élémentaire incomplet.

L'hypothèse H'2 nous garantit d'avoir une option A (resp. B) par P_A (resp. P_B) véhicules contenus dans un motif élémentaire et dans un motif incomplet. Comme P_A et P_B sont multiples $\Leftrightarrow L_{motif} = P_A$, le motif incomplet ne contiendra que des véhicules ayant l'option B seule. Ce motif incomplet peut être joint à la séquence des motifs complets sans provoquer de non respects.

Dans un troisième temps, nous allons relâcher l'hypothèse H'2 comme suit :

H''.2. : Le nombre de véhicules ayant l'option A et le nombre de véhicules ayant l'option B ne peuvent pas excéder le maximum du respect de leur ratio, *i.e.* $Q_A \leq \left\lfloor \frac{1}{P_A} * Q_{tot} \right\rfloor$ et $Q_B \leq \left\lfloor \frac{1}{P_B} * Q_{tot} \right\rfloor$.

Sous cette nouvelle hypothèse, il suffit de construire une séquence sous l'hypothèse H'2, puis de supprimer des véhicules l'option A ou l'option B en trop (figure C-2).



Figure C-2 : Séquence respectant les contraintes d'espace multiples (B, 1/2 et A, 1/4)

Cette nouvelle séquence respecte toujours l'absence de non respects des contraintes d'espace.

Donc, la propriété 1 est démontrée.

Propriété 2. Si $q_{AB} = Q_{ind}^-$ ou $q_{AB} = Q_{ind}^+$ et P_A et P_B sont premiers entre eux, il existe un séquençement respectant simultanément les deux contraintes de ratio $1/P_A$ et

$$1/P_B \text{ avec } Q_{ind}^- = \left\lfloor \frac{Q_{tot}}{L_{motif}} \right\rfloor \text{ et } Q_{ind}^+ = \left\lceil \frac{Q_{tot}}{L_{motif}} \right\rceil.$$

Dans un premier temps, nous allons poser les hypothèses suivantes :

H.1. : La quantité de véhicules à séquencer, Q_{tot} , est multiple de la longueur d'un motif élémentaire, L_{motif} .

H.2. : Le nombre de véhicules ayant l'option A et le nombre de véhicules ayant l'option B correspond exactement au respect du ratio, *i.e.* $Q_A = \frac{1}{P_A} * Q_{tot}$ et $Q_B = \frac{1}{P_B} * Q_{tot}$.

Tous les motifs élémentaires issus des ratios $1/P_A$ et $1/P_B$ contiennent un et un seul véhicule ayant les deux options simultanément. Par construction de la liste idéale, nous pouvons évaluer le nombre idéal de véhicules ayant les deux options simultanément comme étant le nombre de motifs élémentaires que nous pouvons placer dans une liste idéale.

Sous les hypothèses H1 et H2, le nombre de véhicules ayant les deux options simultanément dans une liste idéale est égal à $\frac{Q_{tot}}{L_{motif}}$.

Dans un deuxième temps, nous allons alléger l'hypothèse H1 en considérant que la quantité de véhicules à séquencer, Q_{tot} , peut ne plus être multiple de la longueur d'un motif élémentaire, L_{motif} . Cela implique une modification de l'hypothèse H2 comme suit :

H'.2. : Le nombre de véhicules ayant l'option A et le nombre de véhicules ayant l'option B correspond au maximum du respect de leur ratio, *i.e.* $Q_A = \left\lfloor \frac{1}{P_A} * Q_{tot} \right\rfloor$ et $Q_B = \left\lfloor \frac{1}{P_B} * Q_{tot} \right\rfloor$.

Cette modification consiste à considérer qu'une séquence est composée par $\left\lfloor \frac{Q_{tot}}{L_{motif}} \right\rfloor$ motifs élémentaires et par un motif élémentaire incomplet. Cela signifie que le nombre de véhicules ayant les deux options est au moins égal à $\left\lfloor \frac{Q_{tot}}{L_{motif}} \right\rfloor$, donc Q_{ind}^- . Le motif élémentaire incomplet, non vide, est une sous partie d'un motif élémentaire. S'il commence par un

véhicule ayant les deux options simultanément, nous pouvons placer $\left\lfloor \frac{Q_{tot}}{L_{motif}} \right\rfloor + 1$ véhicules avec les deux options, soit $\left\lfloor \frac{Q_{tot}}{L_{motif}} \right\rfloor$, *i.e.* Q_{ind}^+ . Sinon, nous pouvons choisir toutes sous parties du motif élémentaire ne contenant pas de véhicules ayant les deux options sans provoquer de non respects. En effet, en construisant une liste idéale avec un motif élémentaire commençant par un véhicule ayant les deux options. Le premier véhicule du motif élémentaire incomplet attendu est un véhicule ayant les deux options. Si ce n'est pas le cas, nous avons un véhicule commençant par A (resp. B) suivi par un véhicule ayant l'option B (resp. A). Ce décalage ne provoque pas de non respects puisque l'écart entre les options A (resp. B) à la jointure à la jointure n'est pas inférieur à P_A (resp. P_B), comme l'illustre la figure C-3.

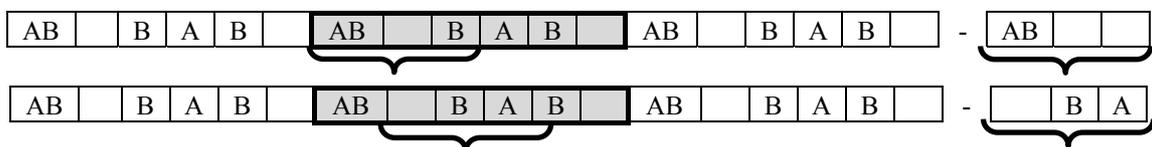


Figure C-3 : Deux exemples de liste idéale avec A en 1/3 et B en 1/2 avec un motif incomplet

Dans un troisième temps, nous allons relâcher l'hypothèse H'2 comme suit :

H''.2. : Le nombre de véhicules ayant l'option A et le nombre de véhicules ayant l'option B ne peuvent pas excéder le maximum du respect de leur ratio, *i.e.* $Q_A \leq \left\lfloor \frac{1}{P_A} * Q_{tot} \right\rfloor$ et $Q_B \leq \left\lfloor \frac{1}{P_B} * Q_{tot} \right\rfloor$.

Sous cette nouvelle hypothèse, il suffit de construire une séquence sous l'hypothèse H'2, puis de supprimer des véhicules l'option A ou l'option B en trop (figure C-4).



Figure C-4 : Exemple de liste idéale avec A en 1/3 et B en 1/2

Donc, la propriété 2 est démontrée.

Dans l'article (Lesert et al, 2005), $Q_{ind}^- = \left\lfloor \frac{Q_{tot}}{L_{motif}} \right\rfloor$ et $Q_{ind}^+ = \left\lfloor \frac{Q_{tot}}{L_{motif}} \right\rfloor$ sont les nombres

idéaux de véhicules ayant les options A et B simultanément.

Propriété 3. Si $q_{AB} \leq Q_{ind}^+$ et P_A et P_B ne sont ni premiers entre eux, ni multiples, il existe un séquençement respectant simultanément les deux contraintes de ratio $1/P_A$ et $1/P_B$.

Un motif élémentaire, pour P_A et P_B non premiers, non multiples (Exemple : 6 et 9), compte au plus un véhicule avec les deux options simultanément. Nous ne pouvons pas créer plus de véhicules ayant les deux options simultanément que le nombre de motifs élémentaires présents dans la liste idéale (nombre de motifs complets et incomplet), soit $\left\lceil \frac{Q_{tot}}{L_{motif}} \right\rceil$, *i.e.* Q_{ind}^+ .

Avec un nombre de véhicules ayant les deux options simultanément inférieur à cette valeur, nous pouvons appliquer le même raisonnement que pour la démonstration de la propriété 1.

Donc, la propriété 3 est démontrée.

ANNEXE D - DEMONSTRATION DE LA PRESENCE D'AU PLUS UN VEHICULE DANS UN MOTIF ELEMENTAIRE

En annexe C, nous avons démontré 3 propriétés caractérisant l'absence de non respects, sous la condition $N_A=1$ et $N_B=1$. Ces propriétés reposent sur le fait qu'un motif élémentaire contienne au plus un véhicule avec les deux options simultanément. Dans cette partie, nous allons le démontrer par construction.

Posons $P_A \geq P_B$.

Montrons qu'un motif élémentaire compte au plus un véhicule ayant les deux options

Un véhicule avec les deux options simultanément apparaît dans une séquence à une fréquence commune, *i.e.* $PPCM(P_A, P_B)$, soit la longueur d'un motif élémentaire. Donc, par motif élémentaire, il n'y aura pas plus d'un véhicule avec les deux options simultanément.

Si P_A et P_B sont premiers entre eux (Exemple : 3 et 7), *i.e.* $PPCM(P_A, P_B) = P_A * P_B$, la distance entre deux véhicules ayant les deux options ne peut pas être strictement supérieure, ni strictement inférieure au pas commun des deux véhicules, *i.e.* $P_A * P_B$. Or, c'est la longueur du motif élémentaire. Donc, il y a un et un seul véhicule avec les deux options simultanément par motif élémentaire.

Si P_A et P_B sont multiples (Exemple : 3 et 6), *i.e.* $PPCM(P_A, P_B) = P_A$, la distance entre deux véhicules ayant les deux options simultanément est égale au pas de la contrainte A. Un motif élémentaire compte un et un seul véhicule avec l'option A. L'option A peut, donc, être positionnée soit sur un véhicule ayant déjà l'option B, soit n'ayant pas d'options. Si elle est positionnée sur un véhicule ayant déjà l'option B, nous trouverons par motif élémentaire un et un seul véhicule avec les deux options simultanément. Si elle est positionnée sur un véhicule n'ayant pas l'option B, nous n'aurons pas de véhicules avec les deux options simultanément dans un motif élémentaire. Donc, un motif élémentaire compte au plus un véhicule avec les deux options simultanément.

Si P_A et P_B ne sont ni premiers, ni multiples (Exemple : 6 et 9), *i.e.* $PPCM(P_A, P_B) = \frac{P_A * P_B}{\alpha}$ avec $\alpha \in \mathbb{N}^*$, un motif élémentaire, commençant par un véhicule ayant les deux options simultanément, n'aura qu'un et un seul véhicule avec les deux options. Un

motif élémentaire, commençant par un véhicule ayant l'option A seule, suivi par un véhicule ayant l'option B seule, n'aura jamais de véhicules avec les options A et B simultanément car, dans ce cas, il n'existe pas de positions communes aux deux options, quelque soit la longueur du motif élémentaire.

En conclusion, si P_A et P_B premiers entre eux, un motif élémentaire compte un et un seul véhicule ayant les deux options simultanément. Sinon, un motif élémentaire compte au plus un véhicule avec les deux options simultanément.

ANNEXE E – VERIFICATION DE LA CONJECTURE PAR RAPPORT AUX TROIS PROPRIETES DE L'ABSENCE DE NON RESPECTS

Nous allons démontrer, ci-dessous, que cette conjecture est vérifiée dans le cas des 3 propriétés précédentes.

Sous les hypothèses $N_A = 1$, $N_B = 1$ et $P_A \geq P_B$, un motif élémentaire contient au plus un véhicule avec les deux options simultanément, démontrée en annexe A. Selon les hypothèses de la conjecture $\frac{Q_A}{Q_{tot}} \leq \frac{N_A}{P_A}$ et $\frac{Q_B}{Q_{tot}} \leq \frac{N_B}{P_B} \Leftrightarrow P_A \leq \left\lceil \frac{Q_{tot}}{Q_A} \right\rceil$ et $P_B \leq \left\lceil \frac{Q_{tot}}{Q_B} \right\rceil$

Propriété 1. Soit P_A et P_B multiples

Comme nous l'avons montré en annexe B, il est possible de construire deux types de motifs élémentaires. Un motif élémentaire comptant un et un seul véhicule avec les deux options simultanément et un motif élémentaire ne comptant pas de véhicules ayant les deux options. Comme les motifs élémentaires sont de longueur P_A , il ne compte qu'un et un seul véhicule avec une option A.

Nous pouvons donc décomposer notre séquence en deux listes idéales. Une liste idéale comptant q_{AB} motifs élémentaires avec un véhicule ayant les deux options et une liste idéale comptant $\left\lceil \frac{Q_{tot}}{L_{motif}} \right\rceil - q_{AB}$ motifs élémentaires sans véhicule ayant les deux options simultanément. La juxtaposition de ces deux listes sous l'hypothèse que les véhicules précédents ou suivants la liste n'ont aucune option ne provoque aucun non respect comme le montre la figure E-1.

A	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0
B	1	0	1	0	1	1	0	1	0	

0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0
1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	

Figure E-1 : Séquence respectant les contraintes d'espace multiples (B, 1/2 et A, 1/4)

Il est donc possible de construire des listes sans non respect quelque soit la valeur de q_{AB} comprise entre 0 et $\left\lceil \frac{Q_{tot}}{P_A} \right\rceil$. Par conséquent, $Q^- = 0$ et $Q^+ = \left\lceil \frac{Q_{tot}}{P_A} \right\rceil$. Donc, la conjecture vérifie la propriété 1.

Propriété 2. Soit P_A et P_B premiers entre eux

Par construction des listes idéales, $Q^- = Q_{ind}^- = \left\lfloor \frac{Q_{tot}}{L_{motif}} \right\rfloor$ et $Q^+ = Q_{ind}^+ = \left\lceil \frac{Q_{tot}}{L_{motif}} \right\rceil$.

Donc, la conjecture 1 vérifie la propriété 2.

Propriété 3. Soit P_A et P_B non premiers entre eux, non multiples,

Comme nous l'avons montré en annexe B, il est possible de construire deux types de motifs élémentaires. Un motif élémentaire comptant un et un seul véhicule avec les deux options simultanément et un motif élémentaire ne comptant pas de véhicules ayant les deux options. La longueur de ces motifs élémentaires est multiple de P_A et de P_B . Ils comptent donc $\frac{L_{motif}}{P_A} > 1$ véhicules avec au moins l'option A et $\frac{L_{motif}}{P_B} > 1$ véhicules avec au moins l'option B.

Cela signifie, comme pour la propriété 1, que nous pouvons construire des listes sans non respects tant que le nombre de véhicules ayant les deux options simultanément n'excède pas le nombre de motifs élémentaires présents dans la séquence à créer, *i.e.* $q_{AB} \leq \left\lceil \frac{Q_{tot}}{L_{motif}} \right\rceil$. Or,

$Q_{ind}^+ = \left\lceil \frac{Q_{tot}}{L_{motif}} \right\rceil$. Par conséquent, $Q^- = 0$ et $Q^+ = Q_{ind}^+$.

Donc, la conjecture 1 vérifie la propriété 3.

ANNEXE F – PPLI - TRAITEMENT DES QUANTITES EXCEDENTAIRES

Dans la partie 4.4.3.1. *Etape 1: Traitement des quantités excédentaires* de l'algorithme PPLI, nous n'avons pas détaillé cette étape car elle intervient occasionnellement. En effet, dans le deuxième chapitre, nous avons montré que la flexibilité demandée au montage permettait d'absorber 94% des variations quotidiennes et commerciales. Cela signifie que le volume induit par le ratio de la contrainte d'espace permet de produire la quantité de véhicules prévue dans 94% des cas. Ici, nous allons décrire en détail cette étape de l'algorithme pour les 6% des cas restants.

Le principe de ce traitement consiste à remplacer dans le programme de production les véhicules ayant des options par des véhicules sans option. Ces remplacements sont réalisés tel que le volume des options n'excède pas le volume induit par le ratio négocié. Puis, nous appliquons les deux étapes suivantes, l'exploitation de la flexibilité disponible et la construction d'une séquence minimisant le nombre de non respects, sur ce nouveau programme. Les véhicules écartés sont ensuite réintroduits dans la liste obtenue en remplaçant des véhicules sans option par les véhicules écartés.

Cette étape consiste à définir l'ensemble des programmes de production, $P'(q'_0, q'_A, q'_B, q'_{AB}, N_A/P_A, N_B/P_B)$, issu du programme de production à évaluer, $P(q_0, q_A, q_B, q_{AB}, N_A/P_A, N_B/P_B)$, tel que le volume des options n'excède pas les volumes induits par les ratios des contraintes d'espace et tel que nous maximisons le nombre d'options A ou d'options B. Nous associons à chaque programme de production, P' , des quantités excédentaires pour les types de véhicules ayant l'option A seule, l'option B seule et les options A et B simultanément. Ces quantités excédentaires seront ajoutées dans la quatrième étape à la liste idéale modifiée construite pour évaluer le programme de production, P' .

Soit $P(q_0, q_A, q_B, q_{AB}, N_A/P_A, N_B/P_B)$, le programme de production dont il faut évaluer le nombre de non respects.

Soit $q_{\max_j} = \left\lfloor \frac{N_j}{P_j} * Q_{tot} \right\rfloor$, le nombre maximal de véhicules ayant au moins l'option j respectant la contrainte d'espace j.

Soit $q_{\max_j} - \min(q_j, q_{\max_j})$, le nombre de véhicules ayant les options A et B

simultanément si nous positionnons tous les véhicules ayant l'option j seule

Soit $q_{AB}^- = \min\left(\min_{j \in \{A, B\}} (q_{\max_j} - \min(q_j, q_{\max_j})), q_{AB}\right)$, le nombre minimal de véhicules ayant

les options A et B simultanément.

Soit $q_{AB}^+ = \min\left(q_{AB}, \min_{j \in \{A, B\}} q_{\max_j}\right)$, le nombre maximal de véhicules ayant les options A et B simultanément.

Nous définissons l'ensemble des programmes de production P' , en faisant varier le nombre de véhicules q'_{AB} ayant les deux options simultanément entre q_{AB}^- et q_{AB}^+ .

Soit $P'(q'_0, q'_A, q'_B, q'_{AB}, N_A/P_A, N_B/P_B)$

avec $q_{AB}^- \leq q'_{AB} \leq q_{AB}^+$,

$q'_A = \min(q_A, q_{\max_A} - q'_{AB})$,

$q'_B = \min(q_B, q_{\max_B} - q'_{AB})$,

et $q'_0 = Q_{tot} - q'_A - q'_B - q'_{AB}$

A partir des programmes de production P et P' , nous pouvons évaluer les quantités des véhicules écartés de la façon suivante :

- Soit $e_A = q_A - q'_A$, le nombre de véhicules ayant l'option A seule excédentaire,
- Soit $e_B = q_B - q'_B$, le nombre de véhicules ayant l'option B seule excédentaire,
- Soit $e_{AB} = q_{AB} - q'_{AB}$, le nombre de véhicules ayant les options A et B simultanément excédentaire.

Exemple : Le programme de production $P(201, 32, 45, 22, 1/7, 1/4)$ contient 12 options A et aucune option B en trop. En effet, il compte 54 options A pour $q_{\max_A} = \left\lfloor 300 * \frac{1}{7} \right\rfloor = 42$ options possibles en respectant le ratio 1/7 et 67 options B pour $q_{\max_B} = \left\lfloor 300 * \frac{1}{4} \right\rfloor = 75$ options possibles en respectant le ratio 1/4. Le tableau F-1 illustre l'ensemble des sous-programmes de production P' devant être évalué pour P .

q'_0	q'_A	q'_B	q'_{AB}	e_A	e_B	e_{AB}
213	32	45	10	0	0	12
213	31	45	11	1	0	11
213	30	45	12	2	0	10
213	29	45	13	3	0	9
213	28	45	14	4	0	8
213	27	45	15	5	0	7
213	26	45	16	6	0	6
213	25	45	17	7	0	5
213	24	45	18	8	0	4
213	23	45	19	9	0	3
213	22	45	20	10	0	2
213	21	45	21	11	0	1
213	20	45	22	12	0	0

Tableau F-1 : Exemple des programmes de production P'

Nous appliquons les étapes suivantes sur un des programmes de production P' . Le programme de production choisi correspond au programme de production ayant le nombre de véhicules ayant simultanément les deux options, q'_{AB} , au plus près de Q_{ind}^- ou de Q_{ind}^+ . Dans cet exemple, nous choisissons le deuxième programme de production, $P(213,31,45,11,1/7,1/4)$.

Ce choix est arbitraire car nous avons jugé que la rareté de la situation ne nécessite pas un intérêt majeur.

ANNEXE G – DESCRIPTION DES DIFFERENTS SOUS PROBLEMES DE SEQUENCEMENT

Dans la partie 4.4.3.3. *Etape 3 : Construction d'une séquence* de l'algorithme PPLI, nous n'avons pas détaillé les différentes phases de cette étape. Cette annexe a pour objectif de décrire plus précisément les principes de ces différentes phases.

Rappelons que la 3^{ème} étape construit une séquence de véhicules qui minimise le nombre de modifications dans une liste idéale pour atteindre le nombre de véhicules ayant les options A et B simultanément, q_{AB} , décrit dans le programme de production, P . Pour cela, cette étape a été décomposée en trois sous problèmes qui dépendent du nombre de véhicules ayant les options A et B simultanément :

- Soit $q_{AB} < Q^-$, le nombre de véhicules ayant les options A et B simultanément dans le programme de production P est strictement inférieur au nombre de véhicules ayant les deux options dans la liste idéale,
- Soit $Q^- \leq q_{AB} \leq Q^+$, selon la conjecture que nous avons présentée ci-dessus, il existe une séquence sans risque de non respect,
- Soit $q_{AB} > Q^+$, le nombre de véhicules ayant les options A et B simultanément dans le programme de production P est strictement supérieur au nombre de véhicules ayant les deux options dans la liste idéale.

Rappelons aussi que $Q^- = \min_{i \in L} (q_{liste_{AB}}(i))$ et $Q^+ = \max_{i \in L} (q_{liste_{AB}}(i))$.

Ces sous problèmes enchaînent différentes phases qui consistent d'abord à utiliser la flexibilité disponible, puis, à minimiser la création de non respects dus au déplacement d'une seule option, l'option A. Ces phases sont interrompues dès que le nombre de véhicules ayant les deux options dans la liste en cours de modification, l' , atteint le nombre de véhicules ayant les deux options dans le programme de production, q_{AB} .

Suite au traitement lié aux phases d'un des trois sous problèmes, nous disposons d'une liste idéale modifiée, l' , telle que $q_{liste_{AB}}(l') = q_{AB}$. Le risque de non respects de cette liste correspond au nombre de non respects de la contrainte d'espacement A.

Soit $F_j(l) = q_{liste_j}(l) - q_j$ pour $j \in \{A, B\}$, la flexibilité disponible pour la contrainte d'espacement j , dans la liste, l .

PREMIER SOUS PROBLEME : $q_{AB} < Q^-$

Le sous ensemble des listes idéales L' correspond à l'ensemble des listes idéales avec le moins de véhicules ayant les deux options simultanément parce que l'écart du nombre de véhicules ayant les deux options est minimal :

$$L' = \left\{ l \in L \mid q_{liste_{AB}}(l) = Q^- \right\} \tag{G.1}$$

Par convention, nous considérons que l'option A est l'option la moins représentée ($q_A < q_B$) dans le programme de production, P .

Ce sous problème se découpe en 4 phases successives.

Phase 1.1 : Nous profitons de la flexibilité disponible simultanément sur les deux options (tant que $F_A(l') > 0$ et $F_B(l') > 0$). L'idée est de supprimer les options du véhicule ayant les options A et B simultanément et de déplacer en fin de liste les véhicules sans option consécutifs tel que leur déplacement ne génère pas de non respects, ni sur A, ni sur B (figure G-1). Ces véhicules serviront dans la phase 1.2.

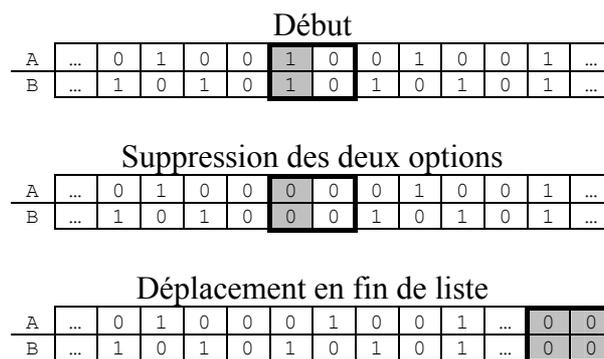


Figure G-1 : Exemple d'application de la phase 1.1

Phase 1.2 : Nous exploitons les véhicules sans options présents en début (resp. en fin) de liste. L'idée consiste à déplacer un véhicule sans option juste après un véhicule avec deux options, puis à déplacer l'option A du véhicule ayant les deux options sur le véhicule intercalé (figure G-2).

Début

A	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	...	0
B	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	...	0

Déplacement du dernier véhicule après le véhicule ayant les deux options

A	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	...	0
B	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	...	0

Déplacement de l'option A sur le véhicule suivant

A	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	...
B	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	...	0

Figure G-2 : Exemple d'application de la phase 1.2

Phase 1.3 : Nous exploitons la flexibilité encore disponible (tant que $F_A(l') > 0$ ou $F_B(l') > 0$) pour supprimer une des deux options des véhicules ayant les deux options simultanément (figure G-3).

Début

A	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	...
B	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	...

Suppression d'une option A sur un véhicule ayant les deux options

A	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	...	
B	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	...

Figure G-3 : Exemple d'application de la phase 1.3

Pour les phases 1.2 et 1.3, nous préconisons de choisir en priorité les véhicules ayant les deux options simultanément tels que leur distance la plus proche avec un véhicule sans option soit maximale.

A la fin de la phase 1.3, nous avons réduit dans la liste le nombre de véhicules ayant les deux options simultanément sans générer de non respects.

Phase 1.4 : A partir de cette phase, chaque déplacement peut créer un non respect. Aussi, pour minimiser le nombre de non respects, nous appliquons deux stratégies et nous choisissons celle qui minimise le nombre de non respects :

La première consiste à déplacer $q_{liste_{AB}}(l') - q_{AB}$ options A de véhicules ayant les deux options simultanément vers les véhicules sans option les plus proches (figure G-4).

		Début											
A	...	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	...
B	...	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	...

		Après											
A	...	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	...
B	...	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	...

Figure G-4 : Exemple d'application de la première stratégie de la phase 1.4

La deuxième consiste à itérer $q_{liste_{AB}}(l') - q_{AB}$ fois, le déplacement d'une option A d'un véhicule ayant les deux options sur un véhicule sans option tel que le déplacement minimise le nombre de non respects de la contrainte d'espace avec le ratio N_A/P_A .

DEUXIEME SOUS PROBLEME : $Q^- \leq q_{AB} \leq Q^+$

Comme nous l'avons précisé en hypothèse, nous supposons qu'il existe une séquence respectant les deux contraintes d'espace. Nous choisissons, l' , une liste idéale parmi l'ensemble des listes idéales, L' .

TROISIEME SOUS PROBLEME : $q_{AB} > Q^+$

Le sous ensemble des listes idéales L' correspond à l'ensemble des listes idéales avec le plus de véhicules ayant les deux options simultanément parce que l'écart du nombre de véhicules ayant les deux options est minimal :

$$L' = \left\{ l \in L \mid q_{liste_{AB}}(l) = Q^+ \right\} \quad (G.2)$$

Soit N'_A/P'_A et N'_B/P'_B , les ratios utilisés pour construire la liste idéale, l , que nous allons modifier.

Par convention, nous considérons que l'option A a le ratio utilisé pour construire la liste idéale, l , le plus petit ($\frac{N'_A}{P'_A} < \frac{N'_B}{P'_B}$).

Ce sous problème se découpe en 3 phases successives.

Phase 3.1 : Nous utilisons la flexibilité disponible sur B. Pour cela, nous choisissons un motif, $m'_B \in \mathcal{M}_{N'_A/P'_A}$, pour le ratio N'_A/P'_A , tel qu'il respecte aussi le ratio N'_B/P'_B . Ce motif contient moins d'options B que ne le permet le ratio N'_B/P'_B . Il est répété simultanément pour les options A et pour les options B. Chaque répétition de ce motif peut

nous obliger à puiser dans la flexibilité disponible pour B. Aussi, ce motif doit-il être répété dans la limite de la possibilité de la flexibilité disponible de B.

Nous allons illustrer cette étape à l'aide de l'exemple ci-dessous :

Soit une liste idéale avec A en 1/2 et B en 2/3 :

A	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	...
B	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	...

Avec $F_B(l')=1$, *i.e.* nous avons une flexibilité de 1 pour B

Soit le motif (1,0) correspondant au ratio 1/2 que nous allons reproduire pour l'option B. Ce motif respecte le ratio 2/3 de l'option B.

Pour appliquer une première fois le motif, nous devons supprimer une option B d'un véhicule ayant l'option B seule. Cette option peut être supprimée car $F_B(l')=1$. Après cette itération, nous n'avons plus de flexibilité disponible (figure G-5).

Début

A	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	...
B	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	...

Première itération

A	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	...
B	1	0	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	...

Figure G-5 : Exemple d'application de la première itération de la phase 3.1

Pour la deuxième itération, nous n'avons pas besoin de puiser dans la flexibilité disponible. Nous pouvons déplacer l'option B du véhicule ayant l'option B seule sur le véhicule ayant l'option A seule (figure G-6).

Première itération

A	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	...
B	1	0	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	...

Deuxième itération

A	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	...
B	1	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	...

Figure G-6 : Exemple d'application de la deuxième itération de la phase 3.1

La troisième itération se déroule comme la deuxième. Mais, nous devons interrompre cette étape à la quatrième itération car il faut supprimer une option B et nous n'avons plus de flexibilité disponible sur B suite à la première itération (figure G-7).

		Troisième itération														
A	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	...	
B	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	...

		Quatrième itération														
A	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	...	
B	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	...

Figure G-7 : Exemple d'application de la troisième et quatrième itération de la phase 3.1

Phase 3.2 : Nous supprimons les $F_A(I')$ premiers véhicules ayant l'option A seule (figure G-8).

		Avant la phase 3.2														
A	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	...	
B	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	...

		Après la phase 3.2														
A	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	...		
B	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	...

Figure G-8 : Exemple d'application de la phase 3.2

A la fin de la phase 3.2, nous avons augmenté dans la liste le nombre de véhicules ayant les deux options simultanément sans générer de non respects. Maintenant, les modifications que nous allons apporter dans l'étape suivante peuvent générer des non respects qu'il faut minimiser.

Phase 3.3 : Nous déplaçons les options A des premiers véhicules ayant l'option A seule sur un véhicule ayant l'option B seule tel que le nombre de non respects généré soit minimum.

ANNEXE H – PPLI – REINTEGRATION DES QUANTITES EXCEDENTAIRES

Dans la partie 4.4.3.4. *Etape 4 : Réintégration des quantités excédentaires* de l'algorithme PPLI, nous n'avons pas détaillé cette étape car tout comme la première étape (Annexe F), celle-ci intervient occasionnellement au même titre que la première étape. Ici, nous allons décrire en détail cette quatrième étape de l'algorithme.

En partant de la fin de la liste modifiée, nous remplaçons d'abord les véhicules sans option par des véhicules ayant les deux options simultanément dans la limite de e_{AB} véhicules, puis par des véhicules ayant l'option A seule dans la limite de e_A véhicules, et enfin, par des véhicules ayant l'option B seule dans la limite de e_B véhicules.

Le nombre de non respects présents dans la liste idéale modifiée, l' , fournit une évaluation grossière de la difficulté à respecter simultanément les deux contraintes d'espace.

Nous illustrons cette étape avec la figure H-1. Nous avons une liste idéale avec A en 1/3 et B en 1/2 à laquelle nous devons ajouter des excédents ($e_A = 1$, $e_B = 1$ et $e_{AB} = 1$). Cette liste contient 6 non respects (3 non respects pour la contrainte d'espace A et 3 non respects pour la contrainte d'espace B).

Début :

A	X	.	.	X	.	.	X	.	.	X	.	.
B	X	.	X	.	X	.	X	.	X	.	X	.

Après l'ajout (cellules grisées) :

A	X	.	.	X	.	.	X	X	.	X	.	X
B	X	.	X	.	X	X	X	.	X	.	X	X

Apparition des non respects (cellules grisées) :

A	X	.	.	X	.	.	X	X	.	X	.	X
B	X	.	X	.	X	X	X	.	X	.	X	X

Figure H-1 : Exemple de réintégration des excédents

Tableaux

INTRODUCTION	11
1. LE SYSTEME DE PRODUCTION DANS UNE USINE TERMINALE AUTOMOBILE..	17
2. ANALYSE DE L'EXISTANT	53
Tableau 2.1 : Exemple de données prévisionnelles pour un site au mois de Juin 2006.....	56
Tableau 2.2 : Volumes produits sur les sites de production analysés	57
Tableau 2.3 : Fiabilité des prévisions mensuelles de « 3P » sur le site de Poissy (L1 et L2)..	59
Tableau 2.4 : Pourcentage de situations respectant les marges.....	64
Tableau 2.5 : Coefficient de corrélation entre alertes et non respects sur 3 sites de production	71
3. DEFINITION DES CONTRAINTES D'ESPACEMENT	83
Tableau 3.1 : Tableau de synthèse de la modélisation d'un opérateur en difficulté	95
Tableau 3.2 : Comparaison des modélisations SPELEO-1 et SPELEO-2 (23/05/2006)	96
Tableau 3.3 : Amélioration apportée par l'algorithme de El Hadj Khalaf.....	97
Tableau 3.4 : Evaluation de la relation d'un poste de travail et d'une contrainte d'espacement	100
Tableau 3.5 : Correspondance entre la nature de la relation et le libellé de la matrice.....	105
Tableau 3.6 : Exemple de ratios calculés en fonction du volume à produire.....	110
Tableau 3.7 : Description des postes et des contraintes d'espacement	119
Tableau 3.8 : Synthèse des résultats obtenus	120
Tableau 3.9 : Comparaison des postes de travail 5LH3237D et 5LH2218G.....	120
Tableau 3.10 : Contraintes d'espacement négociées du mois de Mai 2006 à Sevel Nord.....	121
Tableau 3.11 : Synthèse des résultats obtenus	123
Tableau 3.12 : Contraintes d'espacement identifiées par la matrice colorée.....	123
Tableau 3.13 : Synthèse des résultats obtenus	125
Tableau 3.14 : Comparaison des jeux de contraintes d'espacement	126
4. LES INTERACTIONS DE CONTRAINTES	129
Tableau 4.1 : Un programme de production	136
Tableau 4.2 : Exemple de ratios compatibles applicables.....	141
Tableau 4.3 : Résultat de l'ajustement des ratios du 22/02/2005 à Rennes – L2.....	160
5. LA MESURE DE LA FLEXIBILITE	163
Tableau 5.1 : Temps de traitement des différents types de véhicules	171
Tableau 5.2 : Dimensionnement des postes de travail	178
Tableau 5.3 : Répartition des alertes de 3 séquences (24/05/2006)	179
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	189

BIBLIOGRAPHIE	195
ANNEXES	203
Tableau A-1 : Comparaison de la valeur des indicateurs d'espacement Renault Vs PSA.....	206
Tableau F-1 : Exemple des programmes de production P'	225

Figures

INTRODUCTION..... 11

1. LE SYSTEME DE PRODUCTION DANS UNE USINE TERMINALE AUTOMOBILE.. 17

Figure 1.1 :	25 jours : de la commande à la livraison	20
Figure 1.2 :	Le flux véhicule dans une usine terminale automobile	21
Figure 1.3 :	L'usine terminale automobile de Poissy	23
Figure 1.4 :	Ligne de montage des ateliers montage	25
Figure 1.5 :	Un poste de travail.....	26
Figure 1.6 :	Le schéma chronologique d'un poste.....	32
Figure 1.7 :	Représentation de la charge de travail d'un opérateur sur un poste.....	32
Figure 1.8 :	Déplacement d'un opérateur sur un poste de travail	36
Figure 1.9 :	Mesures de l'efficacité d'un poste	37
Figure 1.10 :	Lissage de la consommation d'une pièce	38
Figure 1.11 :	Contrainte d'espacement sur un véhicule « haut de gamme » en 1/5	39
Figure 1.12 :	Les indices de flexibilité utilisés	47
Figure 1.13 :	Exemple de la majoration du volume prévisionnel d'une contrainte d'espacement	48

2. ANALYSE DE L'EXISTANT..... 53

Figure 2.1 :	Evolution des critères des contraintes d'espacement	57
Figure 2.2 :	Fiabilité mensuelle des contraintes d'espacement	60
Figure 2.3 :	Fiabilité hebdomadaire des contraintes d'espacement	61
Figure 2.4 :	Fiabilité quotidienne des contraintes d'espacement.....	62
Figure 2.5 :	Evolution du nombre de non respects à Poissy – L2 en Avril 2005	66
Figure 2.6 :	Evolution du nombre d'alertes à Poissy – L2 en Avril 2005	67
Figure 2.7 :	Répartition des alertes par poste à Poissy – L2 le 14/04/2005.....	68
Figure 2.8 :	Comparaison des alertes et des non respects de Poissy – L2 en Avril 2005....	71
Figure 2.9 :	Processus d'équilibrage d'une ligne d'assemblage.....	73
Figure 2.10 :	Le processus de négociation des contraintes.....	75
Figure 2.11 :	Evaluation de la marge et du ratio de chaque contrainte.....	76
Figure 2.12 :	Evaluation de la marge et du ratio de chaque contrainte.....	78
Figure 2.13 :	SPELEO	79

3. DEFINITION DES CONTRAINTES D'ESPACEMENT..... 83

Figure 3.1 :	Représentation graphique des modélisations d'un opérateur en difficulté	86
Figure 3.2 :	Modélisation SPELEO-1	89
Figure 3.3 :	Exemple de calcul avec la modélisation SPELEO-1	90
Figure 3.4 :	SPELEO-1 : 6M1A6247 « Serrage Tuyau Frein » à Poissy (22/04/2005), filtre=0%	90
Figure 3.5 :	SPELEO-1 : 6M1A6247 « Serrage Tuyau Frein » à Poissy (22/04/2005), filtre = 5%	91

Figure 3.6 :	Prise en compte de l'intervention d'un opérateur polyvalent	93
Figure 3.7 :	Modélisation SPELEO-2.....	94
Figure 3.8 :	SPELEO-2 : 6M1A6247 « Serrage Tuyau Frein » à Poissy (22/04/2005)	94
Figure 3.9 :	Poste contraint par une contrainte	100
Figure 3.10 :	Poste sur contraint par une contrainte	101
Figure 3.11 :	Poste sous contraint par une contrainte	101
Figure 3.12 :	Poste impacté par une contrainte.....	101
Figure 3.13 :	Poste non impacté par une contrainte.....	102
Figure 3.14 :	Exemple de nuances possibles dans les relations.....	102
Figure 3.15 :	Exemple de matrice colorée des relations	105
Figure 3.16 :	Pertinence des contraintes d'espacement négociées (Sevel Nord – Mai 2006) 106	
Figure 3.17 :	Pertinence des critères sur les modèles (Sevel Nord – Mai 2006).....	106
Figure 3.18 :	Exemple de simplification des temps de traitement d'un poste de travail .	108
Figure 3.19 :	Exemple d'application du ratio N/P selon Giard et Jeunet	112
Figure 3.20 :	Exemple de ratios compatibles et non compatibles	115
Figure 3.21 :	Exemple d'application de l'indicateur d'espacement PSA	117
Figure 3.22 :	Comparaison des alertes et des non-respects	119
Figure 3.23 :	Description des postes de travail 5LH3237D et 5LH2218G.....	121
Figure 3.24 :	Pertinence des critères des contraintes d'espacement négociées à Sevel Nord 122	
Figure 3.25 :	Résultat avec les contraintes d'espacement négociées.....	122
Figure 3.26 :	Pertinence des critères des contraintes d'espacement identifiées	124
Figure 3.27 :	Résultat avec les contraintes d'espacement négociées.....	124

4. LES INTERACTIONS DE CONTRAINTES 129

Figure 4.1 :	Exemple de séquence mettant en évidence la notion d'interactions de contraintes	132
Figure 4.2 :	Exemple de séquence mettant en évidence la notion d'interactions de contraintes	133
Figure 4.3 :	Exemple de séquence mettant en évidence la notion d'interactions de contraintes	133
Figure 4.4 :	Ensemble des motifs possibles pour un ratio 2/4	137
Figure 4.5 :	Exemple de ratios compatibles et non compatibles	138
Figure 4.6 :	Exemple d'ensemble des motifs d'une contrainte de ratio 3/6	142
Figure 4.7 :	Exemple d'un motif élémentaire	142
Figure 4.8 :	Exemple d'une liste idéale	143
Figure 4.9 :	Propriété 1 : A 1/2, B 1/4, $Q_{tot} = 300$, $Q_A = 150$, $Q_B = 75$, $I_{r_A} = 0$, $I_{r_B} = 0$	144
Figure 4.10 :	Propriété 2 : A 1/7, B 1/4, $Q_{tot} = 300$, $Q_A = 42$, $Q_B = 75$, $I_{r_A} = 0,02$, $I_{r_B} = 0$.	145
Figure 4.11 :	Propriété 3 : A 1/6, B 1/9, $Q_{tot} = 300$, $Q_A = 50$, $Q_B = 33$, $I_{r_A} = 0$, $I_{r_B} = 0,01$..	145
Figure 4.12 :	Algorithme PPLI	148
Figure 4.13 :	A 2/5, B 3/7, $Q_{tot} = 300$, $Q_A = 120$, $Q_B = 128$, $I_{r_A} = 0$, $I_{r_B} = 0,004$	152
Figure 4.14 :	A 1/2, B 1/4, $Q_{tot} = 300$, $Q_A = 150$, $Q_B = 75$, $I_{r_A} = 0$, $I_{r_B} = 0$	152
Figure 4.15 :	A 1/6, B 1/9, $Q_{tot} = 300$, $Q_A = 50$, $Q_B = 33$, $I_{r_A} = 0$, $I_{r_B} = 0,01$	153
Figure 4.16 :	A 1/6, B 7/9, $Q_{tot} = 300$, $Q_A = 50$, $Q_B = 233$, $I_{r_A} = 0$, $I_{r_B} = 0,001$	153
Figure 4.17 :	A 2/5, B 3/7, $Q_{tot} = 300$, $Q_A = 116$, $Q_B = 124$, $I_{r_A} = 0,033$, $I_{r_B} = 0,036$	155
Figure 4.18 :	Outil d'aide à l'analyse des interactions de contraintes	156

Figure 4.19 :	Analyse des interactions de contraintes du 22/02/2005 à Rennes – L2	159
Figure 4.20 :	Evolution du nombre de non respects itération par itération	160

5. LA MESURE DE LA FLEXIBILITE 163

Figure 5.1 :	Eléments structurels composant un système de production flexible.....	166
Figure 5.2 :	Représentation de la charge de travail d'un poste de travail.....	169
Figure 5.3 :	Les indicateurs de perte d'efficacité et de flexibilité	175
Figure 5.4 :	Un poste sous dimensionné	175
Figure 5.5 :	Poste insuffisamment dimensionné.....	176
Figure 5.6 :	Poste présentant un risque de dimensionnement insuffisant.....	176

CONCLUSION ET PERSPECTIVES 189

BIBLIOGRAPHIE 195

ANNEXES 203

Figure A-1 :	Exemple d'application de l'indicateur d'espacement Renault	205
Figure A-2 :	Exemple d'application de l'indicateur d'espacement PSA	206
Figure A-3 :	Comparaison des indicateurs Renault, PSA et des alertes	207
Figure E-1 :	Séquence respectant les contraintes d'espacement multiples (B, 1/2 et A, 1/4)	221
Figure G-1 :	Exemple d'application de la phase 1.1	227
Figure G-2 :	Exemple d'application de la phase 1.2	228
Figure G-3 :	Exemple d'application de la phase 1.3	228
Figure G-4 :	Exemple d'application de la première stratégie de la phase 1.4.....	229
Figure G-5 :	Exemple d'application de la première itération de la phase 3.1	230
Figure G-6 :	Exemple d'application de la deuxième itération de la phase 3.1	230
Figure G-7 :	Exemple d'application de la troisième et quatrième itération de la phase 3.1 ..	231
Figure G-8 :	Exemple d'application de la phase 3.2	231

Sur l'évaluation de la flexibilité de l'atelier montage d'une usine terminale automobile

La concurrence accrue entre les constructeurs automobiles incite nombre d'entre eux à offrir une plus grande variété de véhicules. Cette stratégie nécessite en particulier d'avoir des moyens de production flexibles. L'objectif de ce travail porte sur l'évaluation de la flexibilité de l'atelier montage d'une usine terminale automobile chez PSA Peugeot Citroën. Le dimensionnement de l'atelier montage est réalisé périodiquement, une fois par mois, en fonction des données prévisionnelles. Ces données sont majorées pour permettre à l'atelier montage de faire face à 3 phénomènes que sont les erreurs de prévisions, la difficulté à séquencer les véhicules et les aléas de production.

Dans un premier temps, nous avons écarté les aléas de production car les moyens mis en œuvre par PSA Peugeot Citroën pour les maîtriser permettent d'envisager qu'ils deviendront secondaires, vis à vis des besoins de flexibilité, à court ou moyen terme. Dans un deuxième temps, nous avons montré que les prévisions commerciales sont relativement fiables. Nous nous sommes donc focalisés sur le séquençement des véhicules difficiles à fabriquer. Pour permettre aux opérateurs de travailler sans solliciter l'aide d'un opérateur polyvalent, nous devons espacer ces véhicules à l'aide de contraintes d'espacement (et de ratios associés) contraignant l'ordonnancement des véhicules. Nous avons donc proposé une nouvelle méthode pour définir les contraintes d'espacement, et calculer leurs ratios. Nous avons aussi caractérisé un phénomène dit d'interactions de contraintes. Nous avons démontré 3 propriétés analytiques dans un cas de 2 contraintes d'espacement et proposé des outils pragmatiques permettant d'aborder des cas réels. Enfin nous avons proposé des indicateurs de mesure de flexibilité.

L'ensemble de nos contributions fournit aux acteurs industriels différentes approches et outils pour aborder le choix du compromis conduisant à la flexibilité juste nécessaire.

Mots-clés :

Flexibilité, dimensionnement, équilibrage, séquençement de véhicules, contraintes d'espacement, ordonnancement, interaction de contraintes.

On the evaluation of the flexibility of mixed-model assembly lines in automotive industry

The increased competition among car manufacturers encourages a number of them to offer a wide range of vehicles. This strategy requires, in particular, having flexible means of production. This study deals with the evaluation of the flexibility on the mixed-model assembly line of the car manufacturer, PSA Peugeot Citroën's. The dimensioning of the mixed model assembly line is carried out periodically, once a month, according to the forecast data. A security margin is added up to the forecast data in order to take into account the forecasts errors, difficulties in creating a sequence of vehicles which respects all the constraints, and random perturbations encountered during the assembly process. .

In this study, we set aside the flexibility required to overcome the perturbations during production. Indeed, PSA Peugeot Citroën has recently implemented several applications to control such perturbations. Hence, the flexibility required to handle them is expected to be negligible in the short or medium term. Additionally, we showed that the forecasts are relatively reliable. As a result, the focus of this study is on the sequencing of the difficult-to-manufacture vehicles. To allow operators to work without requesting the assistance of another operator, these vehicles must be spaced using ratio constraints forcing the scheduling of the vehicles. For the time being, these ratio constraints are defined with respect to the number of vehicles to produce and the physical constraints of the assembly line. Here, we proposed a new affined method to define the ratio constraints, and to calculate their ratios, taking into account the effective workload of the operators. We also characterized a phenomenon which we call the "interactions of constraints". We showed 3 analytical properties in the case of 2 ratio constraints and proposed pragmatic tools allowing application in real-world cases. Finally, we proposed a method to measure the flexibility.

Our contributions provide the industrial actors with various approaches and decision support tools which help them to make choices, to measure the flexibility installed and evaluate different scenarios.

Keywords:

Flexibility, dimensioning, load balancing, car sequencing problem, ratio constraints, scheduling, interactions of ratio constraints.