

CHAPITRE 2

PROBLÉMATIQUE D'ORDONNANCEMENT DE VOITURES

2.1 Introduction

L'industrie automobile a aujourd'hui plus de cent ans. D'une production artisanale, elle est rapidement passée à une production de masse dès les années 20, lorsque la demande est devenue forte. À l'époque, les consommateurs étaient largement limités dans le choix de leurs voitures par l'offre disponible : comme l'illustre la célèbre déclaration d'Henri Ford : « *le client peut tout choisir, même la couleur, à condition qu'elle soit noire.* ». Depuis cette époque, l'environnement économique a beaucoup évolué. Pour survivre à la compétitivité mondiale, les entreprises doivent sans cesse innover et répondre le plus rapidement possible et sans erreurs aux exigences et attentes de ses clients en termes de qualité, de coût et de délais de mise à disposition. Ainsi, l'industrie est passée de la production en *flux poussés*, à la production en *flux tirés* : c'est la commande qui déclenche la production de la voiture, et non plus la production de la voiture qui déclenche la recherche d'un acheteur. Le but est de pouvoir fournir au client la voiture prévue, le jour prévu, au coût minimum et sans négliger la qualité. Les efforts sont faits à tous les niveaux de la fabrication : aussi bien pour la gestion des commandes que pour la production de la voiture ou la livraison de celle-ci. Les usines d'assemblage n'échappent pas à cet effort. En effet, bien que les modèles de voitures fabriqués par les constructeurs soient toujours limités, la présence d'options choisies par le client augmente considérablement le nombre de types de voitures produits. Cependant, étant donné le coût des installations, ces différents modèles sont tous assemblés sur la même chaîne de montage. De nouveaux problèmes d'ordonnement sur ces chaînes sont alors apparus comme le problème d'ordonnement de voitures (*car sequencing*).

L'ordonnancement de la production, dans l'industrie automobile comme dans la plupart des industries, est une problématique complexe. Elle consiste à déterminer une séquence d'exécution de travaux de façon à satisfaire un ou plusieurs objectifs pouvant être conflictuels, en tenant compte d'un certain nombre de contraintes temporelles (délais, contraintes d'enchaînement) et de contraintes portant sur la disponibilité des ressources requises [Lopez et Roubellat 2001]. Si la formulation de tels problèmes peut paraître simple, leurs résolutions s'avèrent souvent complexes. En effet, les problèmes d'ordonnancement sont souvent des problèmes d'optimisation combinatoire dont la complexité est maintenant établie. Pour la majorité de ceux-ci, il n'existe pas d'algorithmes connus pour les résoudre de façon optimale dans un temps polynomial. La plupart des problèmes d'ordonnancement sont *NP-difficiles* [Garey et Johnson 1979; Chapman 1987]. Il s'ensuit que la plupart des problèmes d'ordonnancement industriels s'avèrent encore plus complexes en raison de leurs tailles et des différentes contraintes supplémentaires relatives à l'environnement de production. Apporter des solutions efficaces et performantes à ce type de problèmes constitue assurément un enjeu économique important pour une entreprise.

Ce chapitre décrit la problématique d'ordonnancement de voitures dans une chaîne de montage automobile qui est utilisée dans la suite de cette thèse. La section 2.2 dresse un rapide aperçu de l'industrie automobile mondiale et canadienne. Par la suite, nous décrivons brièvement, à la section 2.3, le fonctionnement d'une usine d'assemblage de voitures, cette présentation ne se veut pas exhaustive, mais a uniquement pour but d'introduire un minimum d'éléments nécessaires permettant au lecteur de mieux cerner la problématique de ce travail de recherche.

2.2 Présentation de l'industrie automobile mondiale

L'industrie automobile est un des secteurs industriels suscitant le plus d'intérêt au niveau de la communauté scientifique. Cet intérêt s'explique par le fait que cette industrie représente des enjeux économiques considérables pour les pays producteurs. Ce secteur constitue aussi un immense champ d'innovation tant au niveau technologique qu'au niveau organisationnel ou conceptuel. Afin de mieux comprendre les enjeux de ce secteur, les prochaines sous-sections présentent un rapide portrait de l'industrie automobile et de son évolution.

2.2.1 Historique

Avant 1914, la construction automobile répond aux caractéristiques des produits de luxe et aux exigences d'une clientèle restreinte. Les voitures sont construites quasiment sur mesure et ce, souvent par des artisans. Rapidement, la demande de la clientèle va imposer la transformation de cet artisanat en une industrie centrée sur un découpage des tâches et sur l'utilisation à chaque étape de machines spécialisées.

Ce type d'organisation de la production industrielle est formalisé pour la première fois par Frederick W. Taylor qui commence sa carrière comme ouvrier avant de devenir ingénieur. En 1903, il développe sa théorie de l'organisation scientifique du travail dans son ouvrage *Shop Management* [Taylor 1911]. L'idée principale est de décomposer les tâches, de minuter les gestes des ouvriers pour améliorer la qualité, diminuer les coûts et les délais. C'est le début du travail à la chaîne et de la production de masse. Au-delà de la production, le taylorisme touche également le management de l'entreprise au sens large.

Reprenant les théories libérales, Taylor soutient que chaque individu en donnant le meilleur de lui-même concourt au bien général de toute l'entreprise.

Dès 1908, Henry Ford voit tout le bénéfice que l'industrie automobile peut tirer de l'application de ces théories. La Ford T naît ainsi d'un concept industriel : la fabrication en grande série. Voiture rustique et sans variantes, elle est accessible à une large classe moyenne. Associée à une solide réflexion commerciale (Henry Ford développe les premières formules de crédit), la logique industrielle est un succès populaire. Jusqu'en 1927, quinze millions de Ford T seront produites. Le taylorisme connaît dès lors, avec l'essor du Fordisme, un développement fulgurant.

Dans ce contexte de profonde mutation industrielle caractérisant l'entre-deux-guerres, émergent des mouvements sociaux de contestation que les patrons vont rapidement prendre en compte. En effet, si le taylorisme permet d'accroître la productivité et favorise l'emploi peu qualifié, il apparaît vite que l'accroissement de la production ne peut être obtenu que par le surmenage. L'ouvrier réduit au rang de manœuvre voit sa situation intellectuelle et sociale amoindrie, la monotonie du travail et l'absence d'effort intellectuel sont décourageants.

Après 1945, l'industrialisation redevient la priorité des états. En France, les nationalisations et le Plan encouragent la reconstruction et la modernisation de l'outil de production afin de pérenniser la croissance économique que risque parallèlement d'entraver la pénurie de main d'œuvre. La production automobile est alors partagée entre les principaux constructeurs de l'époque. Cependant, les années 60 et 70 voient la population ouvrière décliner. Les industries, notamment automobile, n'apparaissent alors plus comme

le fer de lance de l'économie, desservie par l'image du taylorisme. Les préoccupations grandissent en outre quant à l'impact environnemental de telles activités. Dans ce contexte, se développent des thèses fondées sur la motivation du travailleur et sur l'enrichissement des tâches par l'accomplissement d'une œuvre utile et personnalisée. D'autres pays, comme l'Allemagne ou le Japon ne connaissent pas la même pénurie de main d'œuvre et ne vont pas suivre la même évolution. Au début des années 60, l'économie japonaise est dominée par des groupes industriels dont les activités automobiles se partagent un marché étroit. Le taylorisme y apparaît inapplicable notamment en raison du manque de place pour entreposer les stocks importants liés à une telle organisation de la production. Pour supprimer ces stocks, Taiichi Ohno, ingénieur chez Toyota, invente le moyen de supprimer ces stocks en modifiant l'organisation de la sous-traitance et de la production. Afin de supprimer tout gaspillage qui augmente les coûts, il ne faut produire que ce qui est commandé, ne commander que ce qui est nécessaire et ne livrer les commandes qu'au moment où elles sont utiles. Ainsi naissait le système de production Toyota basé sur ces principes de *juste à temps* et de *flux tirés* [Soulard 2002].

Les crises des années soixante-dix plongent tous les secteurs industriels dans une période de récession. Dans l'industrie automobile, comme ailleurs, le modèle fordien atteint ses limites. À l'image des constructeurs japonais, les occidentaux doivent envisager d'autres façons de produire, car d'autres manières de consommer sont apparues. La priorité aujourd'hui est de mieux prendre en compte la demande et les évolutions du marché. La qualité, le respect des coûts et des délais, la flexibilité nécessaire pour produire des modèles

de plus en plus nombreux et diversifiés deviennent les maîtres mots de l'organisation et de la stratégie industrielle de la majorité des constructeurs.

En changeant d'objectif, l'industrie automobile change aussi de visage. La section suivante présente les principaux acteurs actuels de ce secteur industriel.

2.2.2 Les principaux acteurs

En une quinzaine d'années, la production automobile mondiale a progressé de plus de 40 % avec 69.3 millions de véhicules, dont 50 millions de véhicules légers. En 2006, la production a progressé de 4.2 % soit un ralentissement de 1.6 % par rapport à 2004. Depuis le début du XXI^e siècle, l'Europe n'est plus la première zone de production. Elle est désormais devancée par la zone Asie-Océanie dont la production a progressé de 60 % depuis 1990 grâce essentiellement à la Chine qui fabrique actuellement plus de 7.2 millions de véhicules.

La production automobile est toujours dominée par les dix premiers groupes qui produisent 73 % des véhicules contre 80 % il y a 7 ans. Après avoir dépassé Ford pour devenir le second constructeur mondial derrière General Motors en 2004, le groupe Toyota est devenu, en 2007, le premier constructeur mondial tous véhicules confondus. Le Tableau 2.2 présente le classement des principaux constructeurs automobiles ainsi que leur production pour l'année 2006. De son côté, le Tableau 2.3 présente le classement *Automotive news 2008* pour les ventes de voitures des 10 premiers groupes pour l'année 2007.

Rang	Constructeur	Production totale (en milliers d'unités)	Production de véhicules légers
1	General Motors	8 926	5 708
2	Toyota	8 036	6 800
3	Ford	6 268	3 801
4	Alliance Renault-Nissan	5 716	4 598
5	Groupe VW	5 685	5 430
6	Hyundai-Kia	3 844	3 413
7	Honda	3 670	3 550
8	PSA Peugeot-Citroën	3 357	2 961
9	Chrysler	2 545	710
10	Fiat-Iveco	2 318	1 754

Tableau 2.2 : La production des principaux constructeurs automobile en 2006 [source CCFA-OCIA]

Rang	Constructeur	Nombre d'unités vendues
1	Toyota	9 366 000
2	General Motors	8 902 252
3	Groupe VW	6 191 618
4	Ford	5 964 000
5	Hyundai-Kia	3 961 629
6	Honda	3 831 000
7	Nissan	3 675 574
8	PSA Peugeot-Citroën	3 428 400
9	Chrysler	2 676 268
10	Fiat-Iveco	2 620 864

Tableau 2.3 : Classement *Automotive New'2008 Global Data Book* pour les ventes de véhicules en 2007

En 2006, les immatriculations de véhicules ont augmenté de 3.6 % par rapport à 2005 pour atteindre 67,8 millions dans le monde. La croissance se situe principalement en Europe de l'est et en Asie, notamment en Chine. Les marchés nord-américains et ouest européen présentent, pour leur part, des croissances régulières mais faibles. Ainsi, l'Europe occidentale et l'Amérique du Nord, marchés de tailles comparables, ne concentrent plus que 55 % des immatriculations mondiales, contre 65 % en 2000. Le Tableau 2.4 présente la

production de véhicules et le nombre d'immatriculations par zone d'activité pour l'année 2006.

	Production (en millier de véhicules)	Immatriculation (en millier de véhicules)
Asie-Océanie	28 192	21 196
Europe	21 406	21 851
ALENA	15 882	19 895
Amérique du sud	3 212	3 529
Afrique	566	1 312

Tableau 2.4 : Production et immatriculation dans le monde en 2006 [source CCFA-OCIA]

2.2.3 La place de l'industrie automobile au Canada

Au Canada, l'industrie automobile est le premier secteur de fabrication en importance. Elle représente environ 12 % du PIB de la fabrication et près de 25 % des expéditions manufacturières. La valeur de la production de ce secteur a atteint près de 90 milliards de dollars canadien en 2006. Avec une production de plus de 2.5 millions d'unités, en 2007, le Canada est le 9^{ème} producteur mondial de véhicules et le premier producteur mondial par habitant. Toutefois, l'industrie automobile canadienne subit, sur le continent nord américain, une pression, sans cesse grandissante, du Mexique qui devrait prendre la place du Canada en 2008 comme 9^{ème} producteur mondial de véhicules. Malgré ce recul, le rapport 2007 du consultant Harbour classe le Canada comme le pays le plus productif en Amérique du Nord en ce qui concerne la fabrication de véhicules. En effet, le montage d'un véhicule prend en moyenne 21 heures au Canada, alors que cela prend presque 8% de plus

au États-Unis et plus de 82% au Mexique. Toujours selon ce rapport, le Canada possède les sites industriels les plus performants (1^{ère}, 2^{ème} et 4^{ème} usines de montage les plus productives d'Amérique du nord).

Le marché domestique canadien représente un volume de ventes variant entre 1.4 et 1.7 millions de véhicules par an, réparties entre près de 3.500 concessionnaires. En 2006, le parc automobile canadien compte 19.2 millions de véhicules, dont l'âge moyen est de 8.4 ans; environ 60.5% des véhicules canadiens sont immatriculés en Ontario ou au Québec.

Toutefois, les restructurations et fermetures de sites lancées par GM, Ford et Chrysler à la fin de l'année 2005 (3500 emplois seront éliminés au Canada d'ici la fin de l'année 2008) montrent que le pays n'est pas à l'abri des difficultés globales du secteur automobile. La situation s'est encore dégradée ces derniers mois sous l'effet de plusieurs facteurs, notamment le renchérissement important du dollar canadien qui, allié au ralentissement de la croissance économique américaine, a un impact dévastateur sur l'industrie automobile et plus généralement l'industrie manufacturière canadienne.

2.3 Description d'une usine d'assemblage de voitures

Après avoir brossé un rapide historique de l'industrie automobile et présenté la situation actuelle du secteur, il est maintenant important de préciser le mode de fonctionnement d'une usine d'assemblage de voitures afin de mieux comprendre la problématique de ce travail de recherche. La description d'une usine d'assemblage de voitures présentée dans cette partie de la thèse est basée sur la description proposée dans la donnée du Challenge ROADEF 2005 [Nguyen et Cung 2005].

À ce stade, il faut de mentionner qu'une usine d'assemblage de voitures est généralement constituée de chaînes de montage. Chaque chaîne de production est composée de trois ateliers successifs par lesquels les voitures passent successivement à vitesse constante sur la courroie d'un convoyeur : *la tôlerie, la peinture et l'assemblage*. De cette manière, les voitures passent dans le même ordre par les différents postes de travail de chacun des trois ateliers l'un à la suite de l'autre. Autrement dit, la séquence de production déterminée à l'entrée de la chaîne est la même pour les trois ateliers. Comme nous pourrions le constater, chacun de ces ateliers ne poursuit toutefois pas les mêmes objectifs. Les trois ateliers conventionnels d'une chaîne de montage automobile sont illustrés à la Figure 2.1.



Figure 2.1 : Les trois ateliers d'une usine d'assemblage automobile [Nguyen et Cung 2005]

Chaque atelier possède ses propres contraintes. Dans l'atelier de tôlerie, les différentes armatures métalliques de la voiture sont assemblées et soudées afin d'obtenir la carrosserie de la future voiture avec ses ouvrants. En général, c'est l'atelier le plus automatisé car la plupart des manipulations et des soudures sont faites par des robots. Dans cet atelier, la durée de changements des outils de presses incite à la fabrication par lot [Lopez et Roubellat 2001].

Après être passées par l'atelier de tôlerie, les caisses à nues passent à l'atelier de peinture où elles sont traitées contre les agressions extérieures qu'elles auront à subir. La

caisse est ensuite rendue étanche au bruit et à l'eau avant d'être peinte en utilisant des pistolets à peinture. À chaque changement de teintes dans la séquence de production, les pistolets sont purgés à l'aide d'un solvant spécial. Les coûts d'utilisation du solvant pour chacune des purges étant non négligeables, il importe de minimiser la consommation dudit solvant et, par conséquent, le nombre de purges. Dans cet atelier, on cherche donc à regrouper les voitures de même teinte, aussi appelées *rafale de teinte*, afin de minimiser le nombre de purges en générant des rafales de teintes les plus longues possible.

Une fois peintes, les caisses passent à l'atelier d'assemblage. C'est dans cet atelier que les différentes pièces mécaniques et électriques, les garnitures et les options de la voiture sont ajoutées. Ces pièces représentent près de 70 % de la valeur de la voiture finale [Lopez et Roubellat 2001]. En général, l'atelier d'assemblage est l'atelier qui nécessite le plus de personnel car une grande partie des travaux y est effectuée manuellement. La diversité de voitures à assembler dans cet atelier entraîne indubitablement une variabilité sur les différents postes en bord de chaîne qu'il est important de *lisser* afin d'éviter un blocage complet de la chaîne de montage. Pour cela, il faut espacer le plus possible les voitures nécessitant des opérations lourdes afin de ne pas surcharger les postes de travail concernés par l'assemblage de ces voitures.

Les différents ateliers de la chaîne de montage possèdent donc des contraintes spécifiques, très souvent conflictuelles, qu'il est impératif de respecter pour que chaque atelier fonctionne correctement. Dans cet optique et afin d'éviter des coûts supplémentaires, il est important de déterminer au préalable dans quel ordre les voitures doivent arriver sur la chaîne. L'évolution des besoins de la clientèle a toutefois entraîné une diversité importante

au niveau de la production de voitures et a complexifié la tâche du planificateur. On est alors confronté à un problème qualifié *d'ordonnancement sur ligne de produits hétérogènes* qui cherche à éviter les phénomènes de *désamorçage* ou de *saturation* conduisant à des arrêts de la ligne. C'est cette problématique que nous abordons dans ce travail de recherche. La section suivante présente le problème d'ordonnancement de voitures (*car sequencing*) qui représente un enjeu économique important pour les constructeurs.

2.4 Problématique d'ordonnancement de voitures

La problématique d'ordonnancement de voitures est apparue dans le secteur de production lorsque la personnalisation des voitures a remplacé la standardisation de masse. Dans la littérature, on retrouve plusieurs formulations de problème d'ordonnancement de voitures en fonction des différents objectifs visés, les sections suivantes en présentent quelques-unes.

2.4.1 Ordonnancement et juste à temps

Une des préoccupations des centres de production automobile est de rechercher la meilleure synchronisation possible entre le flux principal des voitures et tous les flux d'approvisionnement de composants. Ceci doit permettre de réduire les coûts de stockage de ces constituants. Dans ce contexte, le problème d'ordonnancement consiste à déterminer l'ordre dans lequel les voitures seront produites afin de garder constant le taux d'utilisation des différentes pièces. Dans l'industrie automobile, ce genre d'approche a été initialement préconisé par la firme japonaise Toyota.

Bautista *et al.* [1996] démontrent que le problème de maintien d'un niveau constant d'utilisation des pièces équivaut à un problème de recherche de chemin minimum dans un graphe. Par conséquent, n'importe quel algorithme de recherche de chemin minimum pourrait être utilisé pour obtenir une solution optimale au problème. Cependant, les auteurs mettent en évidence l'inaptitude de ce genre d'algorithme à résoudre des problèmes de tailles réelles à cause du nombre considérable d'arcs contenu dans des problèmes réels.

Parmi les approches heuristiques utilisées pour résoudre ce problème, on retrouve l'algorithme de Monden connu sous le nom de *Goal chasing method* (GCM) [Monden 1998]. Il s'agit d'une heuristique de construction progressive de la séquence qui sélectionne, à chaque itération, le modèle permettant de minimiser la distance entre la consommation effective et la consommation idéale des composants. L'estimation de l'éloignement des taux de consommation est calculée à partir du principe de la distance euclidienne. De leur côté, Leu *et al.* [1996] développent un algorithme génétique pour minimiser la variabilité de la consommation de pièces. Les auteurs montrent la supériorité de leur algorithme par rapport à l'heuristique de Monden dans la plupart des cas examinés.

2.4.1 Ordonnancement par lissage de la charge de travail

L'approche par lissage de la charge consiste à uniformiser la demande en main d'œuvre tout au long de la chaîne. Une de ces formulations est connue sous le nom de *problème de variation du taux de produit*. Soit $qant_m$ la quantité de voitures d'un modèle m donné à ordonnancer, avec $m = 1 \dots M$ et N voitures à produire au total.

On a alors :

$$N = \sum_{m=1}^M qant_m \quad (2.1)$$

Soit nr_{mp} le nombre d'unité du modèle m ordonnancée entre les positions 1 et p . Le taux idéal τ_m d'unités du modèle m dans la séquence de voitures est donné par :

$$\tau_m = \frac{qant_m}{N} \quad (2.2)$$

Entre les positions 1 et p le nombre idéal de voitures du modèle m est égal à ni_m , son nombre réel est nr_{mp} . L'objectif est donc de minimiser la distance entre le nombre idéal et le nombre réel de voitures d'un modèle donné. Ceci s'écrit :

$$\sum_{p=1}^N \sum_{m=1}^M (nr_{mp} - ni_m)^2 \quad (2.3)$$

Plusieurs auteurs ont proposé des méthodes de résolution pour cette formulation du problème. Xiaobo et Ohno [1997] développent un algorithme de séparations et d'évaluations progressives permettant de trouver la solution optimale pour de petites instances de problèmes. Thomopoulos [1967] cherche à minimiser plusieurs indicateurs de la perte d'efficacité des opérateurs sur la ligne comme, par exemple, la surcharge de travail. L'auteur propose une méthode de construction progressive de la séquence des voitures, en choisissant à chaque itération la voiture qui minimise les pénalités associées aux différentes pertes d'efficacité. Macaskill [1973] fournit une amélioration de cette méthode. Sumichrast *et al.* [1992] développent, de leur côté, une heuristique reposant sur le même principe mais où l'objectif consiste à minimiser la différence entre le temps (cumulé) idéal d'assemblage et le temps effectif (itérations passées).

2.4.2 Problème théorique d'ordonnement de voitures (POV)

2.4.2.1 Définition du problème

La version *théorique* du POV que l'on retrouve dans la littérature est une version simplifiée de la problématique industrielle qui se préoccupe uniquement des contraintes de l'atelier d'assemblage. Dans cet atelier, chaque voiture est caractérisée par un ensemble d'options O (toits ouvrant, système ABS, etc.). Chaque option est montée sur différents postes conçus pour traiter au plus un certain pourcentage de voitures passant dans l'atelier. Pour éviter que la capacité des postes ne soit jamais dépassée, les voitures nécessitant les mêmes options doivent par conséquent être espacées afin de réguler le rythme de production.

Cette formulation du problème a été décrite pour la première fois par Parello *et al.* [1986]. Le POV consiste donc à déterminer l'ordre dans lequel nc voitures doivent être produites dans l'atelier d'assemblage de manière à installer différentes options sur chacune d'elles. Afin de réguler le rythme de production, la formulation de *contraintes de capacité* sur les options est nécessaire. Ces contraintes s'expriment sous la forme d'un ratio r_k/s_k signifiant que pour toute sous-séquence consécutive de s voitures, au plus r voitures peuvent posséder l'option k . Lorsqu'une contrainte de capacité n'est pas respectée à un endroit de la sous-séquence, on est alors en présence d'un *conflit*. Par exemple, le poste des régulateurs de vitesse peut présenter une contrainte de la forme $3/5$, ce qui signifie que sur n'importe quelle sous-séquence de 5 voitures consécutives sur la ligne, au plus 3 voitures peuvent demander un régulateur de vitesse. Lorsque que plus de 3 voitures demandent l'option dans un bloc de 5 voitures, il y a alors violation de la contrainte de capacité et donc

on comptabilise un conflit. Kis a démontré que ce problème est NP-difficile au sens fort [Kis 2004]. Le POV intéresse la communauté scientifique depuis le milieu des années 80. Une revue détaillée du problème et des méthodes de résolutions utilisées dans la littérature pour le résoudre est proposée dans Delaval [1997].

Afin de simplifier la résolution du problème, les voitures identiques, autrement dit celles qui nécessitent une même configuration d'options sont regroupées en V classes de voitures pour lesquelles on connaît le nombre de voitures à produire c_v . Ces quantités représentent les *contraintes de production du problème*.

Le Tableau 2.5, tiré de Smith [1997], présente un exemple d'instance du POV. Pour cette

instance, on a 5 options (Opt), 12 classes de voitures (V) et $\sum_{v=1}^V c_v = nc = 25$.

			Classes de voitures											
Options	r	s	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1	2	0	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	1
2	2	3	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0	1	1
3	1	3	0	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0
4	2	5	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1
5	1	5	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
c_v			3	1	2	4	3	3	2	1	1	2	2	1

Tableau 2.5 : Un exemple d'instance du POV

Une solution d'une instance d'un POV est représentée par un vecteur de longueur nc contenant une et une seule classe de voiture dans chacune de ses cases. On peut construire une matrice Mat de valeurs binaires de taille $Opt * nc$ à partir des informations contenues dans le vecteur de la solution dans le but d'évaluer cette dernière. On a $Mat_{ki} = 1$ si la classe

de voiture assignée à la position i du vecteur de la solution demande l'option k , 0 sinon. La Figure 2.2 présente une solution partielle pour l'instance du Tableau 2.5. Les options 1 et 3 ne causent aucun conflit dans cette partie de solution. Par contre, pour l'option 2, il existe un conflit aux positions $i+1$ à $i+3$ car la contrainte d'espacement $2/3$ n'est pas respectée. Il en va de même pour l'option 4 aux positions i à $i+4$ et pour l'option 5 aux positions $i+1$ à $i+5$. On peut conclure qu'il existe 3 conflits dans cette partie de la solution.

Solution partielle pour l'instance du Tableau 2.5 :								
Position :	...	i	$i+1$	$i+2$	$i+3$	$i+4$	$i+5$	...
Classe :	...	8	5	4	3	6	9	...
Matrice <i>Mat</i> construite à partir de la solution partielle:								
Option 1 (1/2) :	1	0	0	1	0	1		
Option 2 (2/3) :	0	1	1	1	0	0		
Option 3 (1/3) :	0	0	0	0	0	1		
Option 4 (2/5) :	1	0	1	0	1	0		
Option 5 (1/5) :	0	1	0	0	0	0	1	

Figure 2.2 : Exemple d'évaluation d'une solution du POV

À titre indicatif, le Tableau 2.6 résume les principales notations utilisées dans ce travail pour décrire le POV.

Notations	Signification
nc	Nombre total de voitures à ordonnancer
r_k/s_k	Contrainte de capacité pour l'option k
Opt	Nombre total d'options
V	Nombre total de classes
Mat	Matrice binaire de taille ($Opt * nc$)
c_v	Nombre de voitures de la classe v

Tableau 2.6 : Résumé de la notation du POV

2.4.2.2 Taux d'utilisation et difficulté d'une classe de voitures

L'espace de recherche d'une instance du POV théorique est constitué par l'ensemble de toutes les permutations possibles de nc voitures requérant différentes configurations d'options. On peut donc facilement en déduire que, pour V classes données, l'espace de recherche d'une instance de taille nc correspondra à :

$$\frac{nc!}{c_1! * c_2! * \dots * c_v!} \quad (2.4)$$

Contrairement à d'autres problèmes d'ordonnancement, la difficulté d'une instance du POV ne dépend pas uniquement de la taille de son espace de recherche, mais aussi du *taux d'utilisation* des différentes options (tu_k), comme l'a indiqué Smith [Smith 1997]. Le taux d'utilisation d'une option k correspond à la proportion de voitures qui requièrent l'option k par rapport à la capacité maximale pour cette option. Formellement, le taux d'utilisation d'une option k s'exprime comme suit :

$$tu_k = \frac{nb_k}{\lceil nc * r_k / s_k \rceil} \quad (2.5)$$

où nb_k correspond au nombre de voitures nécessitant l'option o . Un taux d'utilisation proche de 1 indique que la demande est proche de la capacité maximale du poste, et par conséquent que l'option est très contrainte [Gottlieb *et al.* 2003].

La difficulté D_v d'une classe v est par la suite obtenue en additionnant simplement les taux d'utilisation des options appartenant aux voitures de cette classe [Gottlieb *et al.* 2003] :

$$D_v = \sum_{k=1}^{Opt} O_{vk} tu_k \quad (2.6)$$

2.4.2.3 Résolution du POV à l'aide de méthodes exactes

Le POV a souvent été formulé comme un problème de satisfaction de contraintes (CSP). Il peut donc être résolu à l'aide d'algorithmes issus de la programmation par contrainte (backtracking, backjumping, forward checking ...) [Régin et Puget 1997; Smith 1997; Boivin 2005]. Cependant, il a été observé que la complexité des contraintes inhérentes au POV fait que ce type d'algorithmes ne représente pas généralement des approches adéquates pour la résolution de certaines instances de ce problème [Smith 1997].

Une autre manière d'aborder ce problème, à l'aide de méthodes exactes, consiste à le formuler sous forme de programme linéaire. Drexler et Kimms [2001], Estellon *et al.* [2007], Prandtstetter et Raidl [2007] et Gravel *et al.* [2005] proposent chacun une formulation du problème à l'aide d'un modèle linéaire en nombres entiers. Les auteurs ont testé les performances de leurs approches à l'aide d'un jeu d'instances générées pour Drexler et Kimms et d'ensembles de tests de la littérature pour Estellon *et al.*, Prandtstetter et Raidl et Gravel *et al.* Si les résultats se sont montrés concluants pour certains problèmes, ils montrent aussi les limites de ce type d'approche pour les problèmes les plus difficiles. Il est important de préciser que, contrairement aux autres approches, la stratégie proposée par Estellon *et al.* [2007] n'utilise pas la fonction d'évaluation classique du POV pour compter le nombre de conflits. En effet, les auteurs ont préféré aborder le problème en utilisant la fonction d'évaluation introduite pour le problème industriel d'ordonnement de voitures. Cette fonction d'évaluation est présentée en détail à la Section 2.4.3.

2.4.2.4 Résolution du POV à l'aide approches heuristiques

Les méthodes exactes ayant montré leurs limites, plusieurs auteurs se sont naturellement tournés vers des approches heuristiques. Parmi les approches heuristiques proposées, on retrouve principalement des méthodes de recherche dans le voisinage [Davenport et Tsang 1999; Estellon *et al.* 2007; Gottlieb *et al.* 2003; Neveu *et al.* 2004; Perron et Shaw 2004]. Les différentes approches de recherche dans le voisinage proposées pour résoudre le POV ont généralement été testées à l'aide d'ensembles test de la littérature et diffèrent principalement sur trois points : la manière de construire la solution initiale, le voisinage exploré à chaque mouvement et la manière de se déplacer dans le voisinage.

Vers le milieu des années 80, Parello *et al.* décident d'appliquer des techniques d'intelligence artificielle (IA) classique pour résoudre le POV [Parello *et al.* 1986]. Dans leur article, les auteurs présentent un modèle du problème à base de prédicats et de règles de production. Cependant, les résultats de l'approche ne sont pas concluants et l'utilisation de cette technique d'IA sera plus tard remise en cause [Parello 1988] en raison de la complexité des prédicats à mettre en place pour résoudre un POV de taille intéressante.

Dincbas *et al.*[1988] abordent le POV en utilisant un modèle de programmation logique sous contrainte (PLC). Les auteurs présentent leurs résultats pour des instances de problèmes générées aléatoirement. Les instances les plus complexes sont composées de 200 voitures et ont un pourcentage d'utilisation moyen de 90 %. Même si dans tous les cas, le modèle est parvenu à trouver des solutions sans conflits, l'utilisation de la PLC entraîne des temps de calculs imprévisibles et quelquefois élevés. Smith *et al.* [1996] proposent d'aborder le problème en utilisant un réseau de neurones basé sur le modèle de Hopfield

[Hopfield et Tank 1985]. Les résultats expérimentaux présentés par les auteurs montrent que leur approche se limite à la résolution de très petites instances du problème avec un faible taux d'utilisation.

On retrouve aussi des approches basées sur l'optimisation par colonies de fourmis (ACO). Solnon [2000] a introduit un premier ACO dédié à la résolution des problèmes de satisfaction de contrainte par permutation. L'algorithme sera par la suite bonifié par l'addition d'une heuristique gourmande [Gottlieb *et al.* 2003]. Gravel *et al.* [2005], de leur côté, ont introduit un algorithme d'ACO (ACS-2D) dont l'une des particularités concerne la probabilité de transition, *i.e* la probabilité de choisir une classe de voitures, qui est calculée en fonction de trois éléments : une trace de phéromones à deux dimensions, le nombre de nouveaux conflits engendrés par l'ajout d'une classe de voitures et la difficulté d'une classe D_v . Récemment, une version raffinée de l'ACS-2D, appelée ACS-3D, qui incorpore une nouvelle structure de trace de phéromones à 3 dimensions a été présentée [Gagné *et al.* 2008]. Les différents algorithmes ACO s'avèrent particulièrement performants pour la résolution du POV.

Finalement, on dénombre très peu d'approches basées sur des algorithmes génétiques. Warwick et Tsang [1995] proposent le GAcSP qui est, à notre connaissance, la première tentative de résolution du POV à l'aide d'algorithmes génétiques. À chaque génération, les individus sélectionnés dans la population sont combinés à l'aide d'un opérateur de croisement adaptatif (UAX). Une fois créés, les nouveaux individus peuvent ne plus respecter les contraintes de production, ils sont alors réparés à l'aide d'un algorithme glouton. Une fois le processus de réparation terminé, chaque nouvel individu est amélioré

en utilisant une procédure de recherche locale. Les expérimentations des auteurs indiquent que le GAcSP permet de résoudre les instances « faciles » du POV, celles avec de faibles taux d'utilisation. Cependant, la performance de la méthode est sérieusement diminuée lorsque le taux d'utilisation augmente. Plus récemment, Terada *et al.* [2006] présentèrent un AG classique pour résoudre le POV. Dans leur approche, les auteurs utilisent un croisement standard à un point de coupure sans aucun opérateur de mutation aléatoire. Comme pour le GAcSP, les résultats expérimentaux présentés par les auteurs montrent que leur approche permet de résoudre des instances avec de faibles taux d'utilisation. Cependant, les performances sont très vite dégradées dès que le taux d'utilisation augmente.

2.4.3 Problème industriel d'ordonnement de voitures

2.4.3.1 Définition du problème

Nous présentons, dans cette section, les principaux éléments définissant le problème industriel d'ordonnement de voitures sur une chaîne d'assemblage tel que décrit par le constructeur automobile Renault dans le cadre du Challenge ROADEF 2005. Le lecteur peut trouver une description détaillée du problème dans Nguyen et Cung [2005] et Solnon *et al.* [2007].

À chaque journée de production, les commandes des clients sont transmises en temps réel aux usines d'assemblage. La tâche quotidienne des planificateurs de ces usines consiste alors : (1) à affecter une journée de fabrication à chaque voiture commandée en fonction des contraintes de capacité des lignes d'assemblage et des délais de livraison promis aux clients; et (2) à ordonnancer les voitures à l'intérieur de chaque journée de fabrication de

manière à respecter le mieux possible les contraintes des trois ateliers de la chaîne d'assemblage. L'ordonnancement étant réalisé en considérant les trois objectifs selon un ordre lexicographique, la séquence trouvée est ainsi appliquée à l'ensemble de la chaîne d'assemblage. Dans la définition du problème industriel d'ordonnancement de voitures présentée dans le cadre du Challenge ROADEF 2005, le constructeur automobile Renault a établi que les technologies utilisées dans l'usine font en sorte que les contraintes de l'atelier de tôlerie peuvent tout simplement être négligées. Le POV consiste ainsi à déterminer la séquence de production d'un ensemble de voitures (nc) en considérant les contraintes de l'atelier de peinture et de montage.

Au niveau de l'atelier de peinture, on cherche à regrouper les voitures d'une même couleur de manière consécutive dans la séquence pour minimiser le nombre d'opérations de nettoyage des pistolets. En effet, les pistolets utilisés doivent obligatoirement être nettoyés à l'aide de solvant entre deux voitures de couleur différente ainsi qu'après un nombre maximal de voitures (rl_{max}) d'une même teinte pour assurer la qualité. Il faut préciser la particularité à l'effet que chaque purge entraîne obligatoirement un changement de couleur. Ainsi, toute solution comportant un nombre de voitures consécutives de même couleur supérieur à rl_{max} doit donc être considérée comme une solution non réalisable.

Au niveau de l'atelier de montage, de nombreux éléments sont ajoutés à la carrosserie peinte pour terminer l'assemblage de la voiture. Celle-ci est caractérisée par un ensemble d'options Opt pour lesquelles les postes réalisant ces options sont conçus pour traiter au plus un certain pourcentage des voitures passant dans l'atelier. Comme pour le problème théorique d'ordonnancement de voitures, ces contraintes de capacité sont

exprimées sous la forme d'un ratio r_i/s_k . Cependant, la formulation industrielle du POV subdivise les contraintes de capacité de l'atelier d'assemblage en deux types, les contraintes liées aux *options prioritaires* et celles liées aux *options non-prioritaires*. La distinction entre ces deux groupes d'options réside essentiellement dans le fait que l'on peut contrer les effets d'un conflit sur les contraintes non-prioritaires en ajoutant, par exemple, du personnel supplémentaire pour accroître le rythme de production. À l'opposé, les contraintes prioritaires sont des contraintes pour lesquelles on ne dispose pas de moyen pour contrer l'effet d'une violation de la contrainte et qui entraînent un blocage de la chaîne. Le respect ou non des contraintes non-prioritaires relève de la politique de l'entreprise alors que celui des contraintes prioritaires est une obligation. Dans cet atelier, nous cherchons ainsi à optimiser deux objectifs distincts : le nombre de conflits liés aux contraintes de capacité sur les options prioritaires (*HPO*) et le nombre de conflits liés aux contraintes de capacité sur les options non-prioritaires (*LPO*).

Nous avons choisi de regrouper les voitures identiques, autrement dit celles possédant une même configuration d'options prioritaires et non-prioritaires, à l'intérieur de V classes pour lesquelles on peut ainsi établir le nombre de voitures à produire (c_v). Ces quantités représentent alors les contraintes de production du problème. La Figure 2.3 (a) présente un exemple de problème industriel pour la production de 25 voitures (nc) possédant 5 options (Opt) formant 6 classes de voitures (V) et avec une possibilité de 4 couleurs différentes réparties dans chacune des classes. Dans cet exemple, on considère que les 3 premières options sont des options prioritaires tandis que les deux options restantes sont non-prioritaires. On définit ainsi une séquence x de production par deux vecteurs représentant

respectivement la classe des voitures (Classes) et les codes de couleur de celles-ci (Couleurs) tel que présenté à la Figure 2.3 (b). Une séquence de production du POVI sera notée $x = \{\text{Classes/ Couleurs}\}$ dans la suite de la thèse et les éléments situés à la position i de la séquence seront définis par $x(i) = \text{Classes}(i)/ \text{Couleurs}(i)$.

<i>Options</i>		Classes #							
		<i>r</i>	<i>s</i>	1	2	3	4	5	6
1		1	2	0	1	1	0	0	0
2		2	5	1	0	1	0	1	1
3		1	3	0	1	0	0	0	0
4		3	5	0	0	0	1	0	1
5		2	3	0	1	1	0	1	0
<i>c_v</i>				5	5	4	4	3	4
Couleur #		1	2	1	1	2	1	1	
		2	1	1	0	2	1	1	
		3	1	3	2	0	0	2	
		4	1	0	1	0	1	0	

(a)

<i>x</i>	1	2	3	4	5	6	.....	21	22	23	24	25
Classes	3	5	5	4	6	4		3	1	4	5	1
Couleurs	4	4	2	2	2	2		3	3	1	1	1

(b)

Figure 2.3 : Exemple d'une instance et d'une solution du POVI

Une autre particularité du problème industriel d'ordonnement de voitures par rapport à sa version théorique réside dans le fait qu'il faut faire le lien entre les différentes journées de production. Ainsi, il faut évaluer la solution en considérant les voitures déjà planifiées à la journée précédente et en extrapolant le nombre minimum de conflits générés avec la journée suivante. De même, on ajoutera un changement de couleur si la première voiture de la journée courante est de couleur différente de la dernière voiture de la journée précédente. Pour évaluer le nombre de conflits sur les options, on procède, tout d'abord à la construction d'une matrice *Mat* de valeurs binaires de taille $Opt * nc$ à partir des

informations contenues dans le vecteur de la solution. Ainsi, on a $Mat_{ki} = 1$ si la classe de voiture assignée à la position i du vecteur de la solution demande l'option k , 0 sinon. La décomposition du vecteur de classes de la solution de la Figure 2.3 en ses différentes options pour former la matrice Mat est présentée à la Figure 2.4. On a également reporté, à la Figure 2.4 (a), la fin de la solution de la journée précédente (positions -5 à -1) pour permettre l'évaluation du nombre de conflits à la jonction des deux journées. De plus, à la Figure 2.4 (b), on évalue la solution en fonction de la journée suivante en supposant des voitures sans aucune option. Ainsi, dans l'exemple de la Figure 2.4 la position -1 correspond à la dernière position de la solution trouvée pour la journée précédente tandis que la position 26 correspond à la première position de la solution de la journée suivante. Pour la journée courante J , les options 1, 3 et 4 ne causent aucun conflit dans cette partie de solution. En effet, pour chacune de ces options, on ne retrouve jamais de situation où, pour tous blocs de longueur s , il y a plus de r voitures possédant cette option. Par contre, pour l'option 2, il existe un conflit aux positions 1 à 5 puisqu'il y a 3 voitures possédant l'option alors que la contrainte établie le maximum à 2. De plus, il existe un conflit aux positions 2 à 6, un autre conflit entre les positions 20 et 24 ainsi que deux autres conflits aux positions 21 à 25 car la contrainte de capacité $2/5$ n'est pas respectée. Pour l'option 5, il existe un conflit puisque la contrainte de capacité $2/3$ est violée pour les positions 1 à 3. Pour la jonction avec la journée précédente, on note un conflit aux positions -1 à 1 pour l'option 1 ainsi qu'un autre conflit aux positions -1 à 2 pour l'option 5. Pour la jonction avec la journée suivante, on note un conflit aux positions 22 à 26 pour l'option 2. Si on considère que les trois premières options sont prioritaires et que les deux autres sont non-prioritaires, il existe

par conséquent, dans cette solution x , 8 conflits sur l'objectif HPO et 2 conflits sur l'objectif LPO. Il ne reste plus qu'à faire le décompte du nombre de changements de couleurs (COLOR) pour terminer l'évaluation de la solution x .

		Journée précédente (J-1)					Journée courante (J)						
Positions		-5	-4	-3	-2	-1	1	2	3	4	5	6	.....
Classes		4	1	4	4	2	3	5	5	4	6	4	
Option	1/2	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	
	2/5	0	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0	
	1/3	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	
	3/5	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	
	2/3	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	

(a)

		Journée courante (J)					Journée suivante (J+1)					
Positions		....	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Classes			3	1	4	5	1					
Option	1/2		1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2/5		1	1	0	1	1	0	0	0	0	0
	1/3		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3/5		0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	2/3		1	0	0	1	0	0	0	0	0	0

(b)

Figure 2.4 : Évaluation de la solution présentée à la Figure 2.3

Le Tableau 2.7 résume la notation employée dans cette thèse pour présenter le POVI.

Notations	Signification
nc	Nombre total de voitures à ordonnancer
r_k/s_k	Contrainte de capacité pour l'option k
Opt	Nombre total d'options
V	Nombre total de classes
rl_{max}	Nombre maximum de voitures consécutives ayant la même couleur
HPO et LPO	Nombre de conflits liés aux options prioritaires et non-prioritaires
$COLOR$	Nombre de changement de couleur

Tableau 2.7 : Résumé de la notation du POV industriel

Dans la donnée du Challenge ROADEF 2005, les organisateurs proposent d'utiliser une somme pondérée en appliquant des poids w_1 , w_2 et w_3 à chacun des objectifs pour établir

l'évaluation de la solution x . Ainsi la qualité d'une solution x est établie par l'équation suivante :

$$F(x) = w_1 * obj_1 + w_2 * obj_2 + w_3 * obj_3 \quad (2.7)$$

où obj_1 , obj_2 et obj_3 correspondent respectivement à la valeur obtenue pour la solution x sur chacun des objectifs selon l'ordre de priorité attribué. Les pondérations w_1 , w_2 et w_3 sont respectivement fixées à 1000000, 1000 et 1 [Nguyen et Cung 2005]. Selon la configuration des différentes usines du groupe Renault, les trois hiérarchisations suivantes des objectifs sont possibles : *HPO-COLOR-LPO*, *HPO-LPO-COLOR* et *COLOR-HPO-LPO*.

2.4.3.2 Méthodes de résolution

Le Challenge ROADEF a connu un engouement sans précédent avec un record de 55 équipes inscrites au début du challenge [Solnon *et al.* 2007] dont 27 ont proposé des méthodes de résolution. Parmi les algorithmes proposés par les équipes ayant participées au challenge, on retrouve principalement des méthodes de recherche dans le voisinage comme le recuit simulé, la recherche tabou itérative, la recherche locale itérative et la recherche à voisinage variable (*variable neighborhood search*) [Benoit 2007; Briant *et al.* 2007; Cordeau *et al.* 2007; Estellon *et al.* 2007; Gavranovic 2007; Ribiero *et al.* 2007], un algorithme d'optimisation par colonie de fourmis (ACO) [Gagné *et al.* 2006] et un algorithme génétique (AG) [Jaszkiewicz *et al.* 2004]. Les travaux de toutes les équipes n'ayant pas été publiés, l'énumération précédente n'est donc pas exhaustive. À la suite du challenge, d'autres auteurs ont abordé ce problème en utilisant la programmation linéaire en nombres entiers [Estellon *et al.* 2005; Gagné *et al.* 2006; Prandtstetter et Raidl 2007], un algorithme hybridant recherche à voisinage variable et programmation linéaire en nombres

entiers [Prandstetter et Raidl 2007], un algorithme de recherche locale itérative [Ribeiro *et al.* 2007] ou encore un algorithme génétique [Siala 2005].

On note ainsi que peu d'auteurs ont proposé des algorithmes évolutionnaires et plus particulièrement des algorithmes génétiques pour résoudre ce problème à l'exception des travaux de Jaskiewicz *et al.* [2004] et Siala [2005].

2.6 Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter les concepts généraux de l'ordonnement de la production ainsi que la problématique industrielle sur laquelle portera cette thèse : le problème d'ordonnement de voitures. En résumé, l'ordonnement peut être vu comme une problématique complexe dans le monde industriel et représente souvent un enjeu important influençant la productivité des entreprises. Dans l'industrie automobile, les nombreux travaux effectués sur le sujet, notamment dans le cadre du Challenge ROADEF 2005, témoignent de l'intérêt que suscite ce problème dans un contexte de production. Le POVI est un problème comportant trois objectifs. D'après la définition du problème [Nguyen et Cung 2005], on constate toutefois que les trois objectifs sont traités selon un ordre de priorité sans compensation possible entre les objectifs. Gagné *et al.* [2006] mentionnent dans leur article l'intérêt qu'il y aurait à considérer simultanément les objectifs afin de générer des solutions de compromis potentiellement intéressantes dans la pratique. Le chapitre suivant présente un domaine utile pour résoudre ce genre de problème, celui de l'optimisation multi-objectifs.