

1999.05

## Analyse de la robustesse des ordonnancements/réordonnements sur ligne de production et d'assemblage dans l'industrie automobile

François Danjou<sup>1</sup>, Vincent Giard<sup>2</sup>, Étienne Le Roy<sup>3</sup>

1. Chercheur doctorant à l'IAE de Paris, 2. Professeur à l'IAE de Paris,  
3. Direction de l'ingénierie véhicule de Renault

**Résumé :** On décrit ici une démarche originale d'analyse de la robustesse des ordonnancements/réordonnements sur ligne de production et d'assemblage dans l'industrie automobile (Renault) par rapport 1) aux aléas de qualité conduisant à reprendre en bord de ligne certaines opérations et 2) aux caractéristiques des véhicules induisant d'importantes contraintes d'espace entre véhicules dotés de certaines options.

**Mots clés :** ordonnancement sur ligne d'assemblage de produits personnalisés par option, ligne d'assemblage, ordonnancement, Renault, robustesse, industrie automobile, simulation, stock de sécurité.

**Abstract :** We describe a new way of analysing the robustness of assembly line assembly line scheduling/rescheduling within the automotive industry (Renault) depending on 1) quality problems involving to redo some operation on the line side 2) car characteristics creating some interval constraints between vehicles owning certain optional parts.

**Keywords :** mixed-model assembly line sequencing, production line, assembly line, scheduling, Renault, carindustry, simulation, safety stock.

## 1 Problématique étudiée

Chaque jour un ensemble d'environ 600 véhicules est mis en fabrication dans une chaîne d'une usine qui, schématiquement, comporte, en séquence, un atelier production en ligne (tôlerie, peinture), un stock de tri d'une capacité de quelques dizaines de véhicules, et une ligne de montage final. Dans cette organisation retenue par Renault, mais que l'on retrouve chez les autres constructeurs automobiles, à quelques variantes près (taille du stock de tri<sup>4</sup>, nombre de stocks de tri). Plusieurs types de stocks de tri existent: certains donnent un accès immédiat à tous les véhicules du stock (stock à accès direct), d'autres correspondent à un ensemble contigu de stocks parallèles fonctionnant en mode FIFO (stock à accès partiel)<sup>5</sup>. Dans les deux cas, ce stock intermédiaire permet donc non seulement de découpler les deux sous-systèmes adjacents en absorbant la désynchronisation des flux reçus et émis mais aussi de modifier l'ordre des véhicules sortant du stock, par rapport à celui des véhicules entrant dans le stock, pour rectifier l'incidence des inéluctables perturbations du séquençement initial (voir [figure 1](#)).

Le séquençement initial de cet ensemble est appelé «film» chez Renault, parce qu'un film est une suite ordonnée d'images et que, dans cette métaphore, chaque image du film correspond à un véhicule répondant à une demande précise<sup>6</sup>, caractérisée par une combinaison d'options de

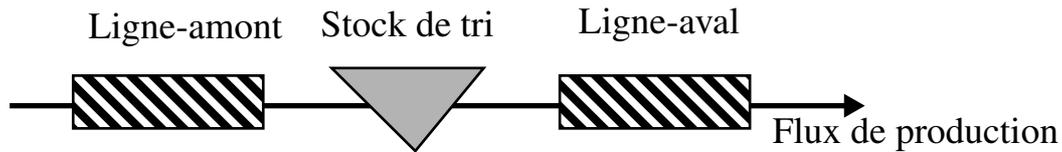
1. Responsable Projets au Département de Créations Industrielles de l'ISMRA; 6 Boulevard Maréchal Juin; 14050 Caen Cedex; Mail: danjou@ismra. fr.

2. Professeur à l'IAE de Paris; 162 rue Saint Charles - F75740 Paris Cedex 15; Mail: Giard. IAE@univ-paris1.fr.

3. Étienne Le Roy, Direction de l'ingénierie véhicule, Renault - DIV - API: TCR RUC 3 40 - 1, Avenue du Golf - 78288 Guyancourt Cedex; Mail: Etienne. Le-Roy@renault. com.

4. Par exemple, le AS/RS (automated storage/retrieval system) de l'usine d'assemblage d'Arlington de la General Motors comporte 192 positions [11].

5. Cette dernière configuration est utilisée de manière très différente selon les constructeurs, Renault utilise cette configuration avec stock de tri de 30 FIFO de profondeur 4, alors que PSA utilise des stocks de tri de 4 FIFO de profondeur 25, [4].



*Figure 1 : Le système productif*

personnalisation. Certaines sont à prendre nécessairement dans une liste fermée (de moteurs, de couleurs, etc.), d'autres correspondent à un élément facultatif (toit ouvrant, etc.). L'ordonnement original tient compte de contraintes techniques et de considérations économiques.

- Les contraintes techniques d'ordonnement résultent de la variabilité du temps opératoire de certains postes de la ligne de montage, en raison d'un travail spécifique lié à une option à monter (par exemple, présence d'un toit ouvrant). Pour ces postes, qualifiés de *critiques en variabilité de temps opératoires*, un véhicule doté d'une option qui conduit à une quantité de travail, supérieure au temps de cycle, doit être suivi de véhicules ayant une quantité de travail inférieure au temps de cycle, jusqu'à ce que la surcharge de travail du premier véhicule soit compensée par le cumul des marges inutilisées par les véhicules suivants. Concrètement, cela se traduit par une prise en compte de contraintes d'espacement entre des véhicules consécutifs présentant certaines options (on précisera au § 3-2.2, page 11, la variété de ces contraintes). Certaines contraintes sont techniquement intangibles tandis que d'autres sont levables au prix de renforts momentanés en personnel, sur les postes de la ligne réalisant ce travail supplémentaire optionnel. Chez Renault, ces postes critiques en variabilité de temps opératoires se retrouvent principalement dans la ligne - aval.
- Sur certains postes de la ligne de production, qualifiés de *postes critiques en séquençement*, le changement d'une option de personnalisation du véhicule (couleur dans un poste de peinture, par exemple), conduit à supporter un coût de réglage. Par exemple, le *type d'options* «couleur du véhicule» peut comporter quelques dizaines d'*options* (les options d'un même type d'option étant nécessairement exclusives); si le nouveau véhicule arrivant en cabine de peinture a l'option «bleue» du type d'option «peinture» alors que la séquence (plus ou moins importante) de véhicules précédents avait l'option «rouge», il faut procéder au nettoyage de pistolet en cabine de peinture. Pour des raisons économiques, on cherche à limiter cette opération qui correspond à un temps de lancement, éventuellement masqué, n'est pas liée à une quelconque variabilité du temps opératoire (identique pour toutes les options d'un même type d'option) et génère un coût supplémentaire. Chez Renault, ces postes critiques en séquençement se retrouvent principalement dans la ligne - amont.

Cette gestion de la diversité ne se limite pas à une gamme de véhicules. Elle concerne aussi les lignes conçues pour assembler des véhicules appartenant à deux gammes différentes techniquement proches<sup>1</sup> car, génériquement, on est en présence du même problème (prise en compte dans l'ordonnement, de postes critiques en variabilité de temps opératoires et de postes critiques en séquençement). L'intérêt stratégique de l'usage, au moins partiel, de cette possibilité est de donner une plus grande flexibilité que celle obtenue par la spécialisation, dans un contexte où les variations de la demande sont de plus en plus fortes et difficilement prévisibles. En effet, le système productif s'adapte immédiatement et sans coût additionnel à un transfert de la demande de véhicules d'une gamme sur des véhicules de l'autre gamme.

De sévères contrôles de qualité sont effectués tout au long de ce processus. Ils se traduisent, sur la chaîne de production, par des reprises de travail qui conduisent à un retrait momentané de

6. Une approche alternative possible, utilisée par certains constructeurs automobiles, s'appuie sur une logique de différenciation retardée que l'on évoquera ultérieurement.

1. Ce qui est le cas de la Safrane et de la Laguna produites sur le site de Sandouville. Cette possibilité implique la prise en compte d'un certain nombre de contraintes techniques lors de la conception des produits et des processus de fabrication.

véhicules pour traiter les problèmes de qualité détectés. Il s'ensuit une perturbation du séquençement du film initial: le véhicule retouché perd, ipso facto,  $n$  places et les  $n$  véhicules suivants, gagnent une place. Le séquençement du film entrant dans le stock de tri est donc différent de celui du film lancé initialement. Ces perturbations sont suffisamment fortes pour que le maintien du séquençement à la sortie du stock de tri ne permette plus d'assurer le respect des contraintes d'espacement impliquées par les postes critiques en variabilité de temps opératoires de la ligne-aval<sup>1</sup>. Le stock de tri permettant de transgresser la règle FIFO, il est possible d'éviter des violations de contrainte en calculant un nouvel ordonnancement sur la base des véhicules détenus dans le stock de tri. Ce réordonnement est glissant, puisque chaque entrée ou sortie modifie la liste des candidats, et doit être résolu en temps réel, en raison de la taille du stock de tri et de la faiblesse du temps de cycle<sup>2</sup>. La résolution de ce problème, rencontré par tous les constructeurs automobiles (voir, par exemple, [24] pour PSA et [23], p. 270 et sq. pour Toyota), s'appuie sur un ensemble d'heuristiques<sup>3</sup>. Le paramétrage de ces heuristiques est délicat et la robustesse de ce module de commande dépend non seulement de l'importance des perturbations (*sensibilité aux aléas*) mais aussi de la structure des contraintes et de leur degré de saturation pour un film donné (*sensibilité au mix*).

Mais l'impact éventuel de ces perturbations ne se limite pas aux seuls problèmes survenant dans la gestion des postes critiques. En effet, la logique d'approvisionnement à flux tendus, retenue par la majorité des constructeurs, conduit à livrer certains composants plus d'une fois par jour, en une quantité correspondant aux besoins prévus jusqu'à la livraison suivante. Or les perturbations d'ordonnement conduisent nécessairement à un désajustement entre la demande effective d'une période et la livraison effectuée pour couvrir la consommation prévue. Lorsqu'un composant est sélectionné dans un ensemble de plusieurs composants, la demande de certains d'entre eux sera faible et irrégulière. Dans ce cas, les perturbations de séquençement nécessitent un stock de sécurité du composant optionnel pour se prémunir contre les problèmes induits par une rupture de stock. Le dimensionnement de ce stock de sécurité ne pose guère de difficulté pour les composants peu onéreux *et* faiblement volumineux, un surdimensionnement n'ayant pas de conséquences économiques notables. Dans le cas contraire, se pose un réel problème de calcul de ce stock de sécurité<sup>4</sup>; ces composants sont qualifiés ici de *composants critiques*.

Un système productif du type de celui étudié est calibré pour pouvoir travailler:

1. Dans la conception du film reposant sur le principe de différenciation retardée (évoquée ci-dessus) et en reprenant la métaphore du film, on définit le film lancé pour une journée par à une suite d'images inachevées, les détails retenus dans ces images correspondant à des caractéristiques partagées par tous les véhicules, plus des caractéristiques de différenciation d'une première partie de la ligne (éventuellement délimitée par un stock de tri), en s'efforçant de respecter les contraintes des postes critiques en variabilité de temps opératoires de cette partie de ligne. À ce point, sur un film inévitablement perturbé, on complète les images en ajoutant de nouvelles caractéristiques de différenciation utilisées sur la seconde partie de la ligne, en s'efforçant toujours de respecter les contraintes des postes critiques en variabilité de temps opératoires de cette partie de ligne et, bien sûr, en tenant compte des caractéristiques de la demande à satisfaire pour la journée; ce processus se poursuit tant que toutes les images ne sont pas complétées. On parle encore de *baptême progressif* pour désigner cette approche.
2. Un temps de calcul de  $n$  cycles oblige en effet à exécuter l'ordonnement des  $n$  premiers véhicules du réordonnement; les arbitrages effectués sur les  $n - 1$  derniers véhicules de cette liste exécutable ne peuvent pas prendre en compte les véhicules qui rentreront en stock postérieurement au départ du premier véhicule de la liste. Ce biais est sans doute faible si la taille du stock de tri est grande; il ne l'est sûrement pas en cas de stock de tri de faible taille. Dans ce dernier cas, l'arbitrage entre la qualité de la solution et la non prise en compte correcte de l'ensemble des possibles milite en faveur d'un temps de calcul d'un ou deux cycles. Cela étant, la taille importante de certains stocks de tri à accès direct (cf. [11]) change considérablement les possibilités calculatoires; reste cependant à prouver que ce surdimensionnement est économiquement justifié.
3. La combinaison d'heuristiques sophistiquées peut même donner naissance à un véritable système-expert ([23], p. 273).
4. L'une des caractéristiques de ce problème est que, contrairement à ceux classiques de gestion des stocks, les demandes d'un composant sur une période ne peuvent respecter l'hypothèse d'indépendance des demandes élémentaires puisque le retard de  $n$  rang d'un véhicule implique l'avance de 1 rang des  $n - 1$  véhicules qui le suivent. On est là en présence d'une problématique ignorée, à notre connaissance, par la littérature spécialisée du domaine. On peut ajouter qu'il est paradoxal que la recherche du «zéro stock» se traduise par la création d'une nouvelle problématique de gestion des stocks.

- avec un temps de cycle donné (ou une certaine plage de temps de cycle en cas de possibilité de reconfiguration immédiate des postes), la production quotidienne résultant de l'amplitude de travail et du temps de cycle;
- avec une certaine variété d'options de personnalisation des véhicules, ce qui se traduit par des contraintes d'espacement entre des véhicules consécutifs caractérisés par certaines options ; l'utilisation du système productif est économiquement optimale lorsque la structure des options demandées est proche de celle qu'autorise la chaîne (sinon les postes correspondants, critiques en variabilité de temps opératoire, sont sous-utilisés); cette saturation totale de ces contraintes est difficilement envisageable<sup>1</sup> en raison de leurs interdépendances (un même véhicule peut être concerné par plusieurs contraintes) et de l'existence de perturbations conduisant à une modification du séquençage initial;
- avec un certain dispositif de traitement des problèmes de qualité qui concerne les traitements des retouches (lequel conditionne les distributions de probabilité du nombre de rangs perdus par un véhicule à retoucher), la taille et la conception du stock de tri, le dimensionnement des stocks de sécurité et la conception des logiciels de réordonnement à la sortie du stock de tri.

Le problème auquel on s'intéresse ici, traité dans le cadre d'un contrat de recherche entre Renault et le GREGOR (centre de recherche de l'IAE de Paris) est celui de l'étude de sensibilité du système productif aux caractéristiques du module de réordonnement d'un stock de tri. On l'aborde par une démarche simulateur mettant rigoureusement sous contrôle les facteurs de sensibilité au mix et les facteurs de sensibilité aux aléas. De manière incidente, cette approche permet d'étudier les stocks de sécurité des composants critiques et d'étalonner certains indicateurs de performance utilisés dans des tableaux de bord.

## 2 Les approches méthodologiques

On examinera successivement les approches proposées dans la littérature spécialisée puis celle qui a été retenue dans cette recherche.

### 2-1 Les approches proposées dans la littérature

La littérature de recherche opérationnelle et de gestion de production s'intéresse aux problèmes posés par les lignes de production depuis une quarantaine d'années. Plusieurs approches complémentaires sont proposées pour résoudre les problèmes rencontrés dans ce domaine. Les approches déterministes s'intéressent principalement à des problèmes de conception d'une chaîne et de détermination d'un ordonnancement. Les approches simulateur stochastiques s'intéressent à la prédictibilité du comportement d'un système productif dans un environnement donné.

#### 2-1.1 Les formulations déterministes du problème d'ordonnement

La conception d'une ligne de fabrication et d'assemblage pose le problème de l'équilibrage de la ligne, qui se formule principalement comme un problème d'affectation de tâches à des postes dans lequel on cherche soit à minimiser le nombre de postes sous contrainte du respect du temps de cycle requis par la charge de chaque poste, soit à minimiser le temps de cycle pour un nombre de postes donné. Cette problématique a provoqué une très abondante littérature<sup>2</sup>, orientée vers la production de méthodes de résolution exacte ou heuristique. D'autres formulations voisines sont également proposées avec adaptation du critère (lissage de la charge) ou prise en compte de contraintes additionnelles. Celle qui nous concerne le plus ici est la possibilité d'utiliser une même ligne pour produire soit des lots de produits différents, soit des produits personnalisés par des options avec variation de la charge de travail pour certains postes de la

1. Toutes les entreprises du secteur automobile gardent d'importantes marges de sécurité pour les raisons évoquées ici [26].

2. Une bonne synthèse en est présentée au chapitre V de [24] qui fournit également une abondante bibliographie.

ligne<sup>1</sup>, qui sont ceux que l'on a qualifiés, en [page 2](#), de critiques en variabilité de temps opératoires; le premier problème se ramène au second si le lot est unitaire. Dans ce cas, la ligne est conçue pour une certaine structure de la demande à satisfaire et la formulation permet l'usage de renforts et/ou d'une certaine compensation de la charge de travail entre véhicules successifs.

Sur une ligne dédiée à la production d'un produit unique ou personnalisé par des options impliquant la même charge de travail sur tous les postes de la ligne, aucun problème d'ordonnement de ce type ne se pose. Il n'en est plus de même en cas de production de produits personnalisés par des options impliquant une variation de la charge de travail sur certains postes. Plusieurs formulations du problème sont proposées<sup>2</sup>.

- Dès 1983, Monden ([\[23\]](#), chapitre XVI et annexe III) présente l'approche Toyota qui vise à définir un ordonnancement lissant la consommation des composants optionnels et propose un algorithme de résolution (Goal chasing method I, avec version simplifiée, le Goal chasing method II) qui, ayant tendance à repousser certains problèmes en fin de journée, a conduit à une modification intégrant une préoccupation de lissage de la charge de travail ([\[23\]](#), chapitre XVII). L'approche initiale, orientée «juste à temps», a fait l'objet de nombreux articles, certains proposant des formulations alternatives, dont certaines intègrent une préoccupation de lissage de la charge de travail, ou des algorithmes plus performants (par exemple Mintelberg [\[21\]](#), Irman & Bulfin [\[15\]](#), Kubiak [\[18\]](#), Kubiak et Sethi [\[19\]](#), Bautista, Companys & Corominas [\[2\]](#), Joo & Wilhelm [\[16\]](#)), d'autres montrant que cette approche est un cas particulier d'une approche plus générale (Mintelberg & Sinnamom [\[22\]](#)).
- Une autre formulation est tournée vers la définition d'une séquence-type lançant au moins une fois tous les types de véhicules et qui est susceptible d'être dupliquée au cours de la journée (Minimum Part Set).
- Une formulation orientée vers la minimisation des coûts de lancements et des renforts nécessaires pour achever le travail que les opérateurs ne peuvent effectuer dans le temps imparti (Bolat, Savsar & Al-Fawzan, [\[3\]](#), Yano & Bolat, [\[31\]](#)). Giard [\[14\]](#) propose une formulation de l'ordonnement cherchant à minimiser les coûts liés aux postes critiques en séquençement, en respectant les contraintes d'espacement liées aux postes critiques en variabilité de temps opératoire.

La formulation des problèmes d'ordonnement est indispensable pour comprendre le «cahier des charges» des logiciels qui effectuent une programmation glissante de la production, détaillée pour la journée avenir et grossière pour les quelques jours suivants. Bien évidemment, l'orientation retenue conditionne la conception du module de réordonnement d'un stock de tri.

## 2-1.2 Les approches stochastiques de l'ordonnement

On peut distinguer deux approches, la première vise à l'obtention de résultats généraux, la seconde vise à fournir une réponse à un problème ponctuel.

### 2-1.2.1 La recherche de résultats généraux

De nombreux travaux ont été entrepris en s'appuyant sur une approche analytique des problèmes d'ordonnement sur ligne d'assemblage (Dallery & S. B. Gershwin, [\[8\]](#)) mais très peu, semble-t-il, pour l'assemblage de produits à composants optionnels (on citera un article de Rachamadugu & Yano [\[26\]](#), qui utilise partiellement une approche Markovienne).

L'approche simulatoire de la performance de règles heuristiques remonte aux travaux de Conway, Maxwell et Miller (1967, [\[6\]](#)). Ces auteurs comparent les performances de règles de

---

1. Ce problème a été introduit par Thomopoulos, [\[27\]](#), [\[28\]](#).

2. Bard, Dar-El & Shtub, [\[1\]](#), proposent une typologie unifiée de ces problèmes, en partant des premiers travaux de Dar-El. Nof, Wilhelm & Warnecke, [\[24\]](#), p. 333-346, distingue les approches focalisées sur le lissage de la consommation de composants optionnels (dans une logique de juste-à-temps), de celles orientées vers le lissage de la charge de travail.

priorité plus ou moins sophistiquées, dans des configurations de job shops, en partant de jeux de données générés aléatoirement et montrent le caractère contingent des performances obtenues, en fonction de certaines caractéristiques structurelles des données portant sur les durées et leurs dispersions ainsi que sur les routes empruntées. Dans ces travaux, on trouve déjà deux usages possibles de l'approche stochastique en ce qui concerne les durées il est possible :

- **a** ) de travailler en univers certain à partir de données générées aléatoirement
- **b** ) de travailler à partir de valeurs moyennes, générées aléatoirement et utilisées dans les heuristiques pour prendre des décisions d'ordonnement, et introduire un aléa dans la réalisation de la durée de ces opérations pour simuler le fonctionnement d'un système à information imparfaite.

Cette démarche b, liée à une prise en compte des erreurs de prévision restera très peu développée au regard de la démarche a.

Cette approche a été retenue par de très nombreux chercheurs pour généraliser ou relativiser ces premiers travaux (voir, par exemple, Cooper [7] ou Panwalker & Iskander [25]). D'autres l'ont appliquée à des problèmes d'ordonnement dans des structures de type flow shop (voir, par exemple, Dannenbring, [9]), à des problèmes d'ordonnement de gestion de projets avec contraintes cumulatives (par exemple, Kurtulus & Davis [20] ou Ülusoğlu & Özdamar [29]) ou à des problèmes d'ordonnement dans des systèmes productifs d'assemblage de type arborescent (voir, par exemple, Fry *et al.* [13]).

En ce qui concerne les lignes d'assemblage, on pourrait considérer que la mise au point d'heuristiques d'ordonnement décrite dans la littérature relève de cette approche mais on n'est pas réellement dans le cadre d'une théorie de la contingence, dans la mesure où il ne s'agit d'évaluer les conditions de performance de règles heuristiques pour construire des ordonnancements résolvant des problèmes dont certaines caractéristiques structurelles restent sous contrôle.

### 2-1.2.2 Les approches empiriques des simulateurs

L'analyse de l'incidence des perturbations sur l'ordonnement sur ligne d'assemblage remonte sans doute, dans l'industrie automobile, à la diffusion de simulateurs industriels relativement faciles d'utilisation. Nous avons connaissance de peu d'écrits dans ce domaine. Yano [26], l'une des meilleures spécialistes de ces problèmes d'ordonnement sur ligne d'assemblage, cite une communication de Koether [17] qui analyse l'influence de la non prise en compte de tous les postes critiques en variabilité de temps opératoires sur la faisabilité de l'ordonnement.

L'absence d'informations sur ces travaux relève sans doute du secret industriel mais il faut noter que ces simulateurs se prêtent assez mal à des travaux de détermination des limites de validité d'outils d'ordonnement ou de réordonnement, il est probable que peu d'études systématiques de ce type aient été entreprises.

## 2-2 L'approche retenue dans cette recherche

L'approche retenue vise, bien évidemment, à répondre aux problèmes que peut se poser un industriel pour un site industriel existant ou à créer. De ce point de vue, on s'inscrirait plutôt dans le cadre de la démarche décrite au § 2-1.2.2. En réalité, l'objectif est plus ambitieux. Sans remettre en cause la conception de la ligne d'assemblage, qui se traduit par un ensemble de règles d'espacement, on cherche à apprécier les limites de bon fonctionnement de ce système productif et des pistes d'une amélioration de sa gestion. Dans cette perspective :

- il s'agit, à titre principal, de procéder à une étude de sensibilité du système productif aux caractéristiques du module de réordonnement d'un stock de tri, en mettant rigoureusement sous contrôle les facteurs de sensibilité au mix et les facteurs de sensibilité aux aléas; de ce point de vue, on s'inscrit plutôt dans le cadre de la démarche décrite au § 2-1.2.1;

- il s'agit, à titre accessoire, mais ceci est lié à la satisfaction du premier objet, de procéder à des recommandations quant au niveau des stocks de sécurité des composants critiques, stocks qui ne sont pas indépendants des perturbations de séquençement et donc de la tension sur les contraintes (mix réel/mix théorique) et de l'importance des aléas; en outre, il s'agit d'aider à un étalonnage correct de certains indicateurs de performance qui sont influencés par la tension sur les contraintes et l'importance des aléas.

On a donc retenu de mettre au point un outil générique ne s'appuyant pas sur un simulateur industriel pour trois séries de raisons:

- l'analyse de robustesse implique un protocole de mise sous contrôle des facteurs retenus qui nécessite un archivage important de résultats à des fins comparatives;
- pour ce type d'étude, le niveau de détail nécessaire de la cartographie des flux est assez limité;
- cette approche nécessite beaucoup de programmation spécifique (module de réordonnement, module de génération de jeux de données, créations d'indicateurs, etc.) qu'il est compliqué de réaliser dans l'environnement d'un simulateur industriel, ce qui conduit à la création de beaucoup de programmes spécifiques externes

En définitive, il a semblé beaucoup plus efficace de développer un système à la fois spécifique et générique.

### 3 Description technique de l'outil d'analyse créé

Le système interactif créé s'appuie sur une base de données relationnelle (§ 3-1). Il dispose d'une interface ergonomique de définition d'une classe de problèmes (§ 3-2) et d'un module d'exploitation des résultats (§ 3-3, page 13).

#### 3-1 Un système s'appuyant sur une base de données relationnelle

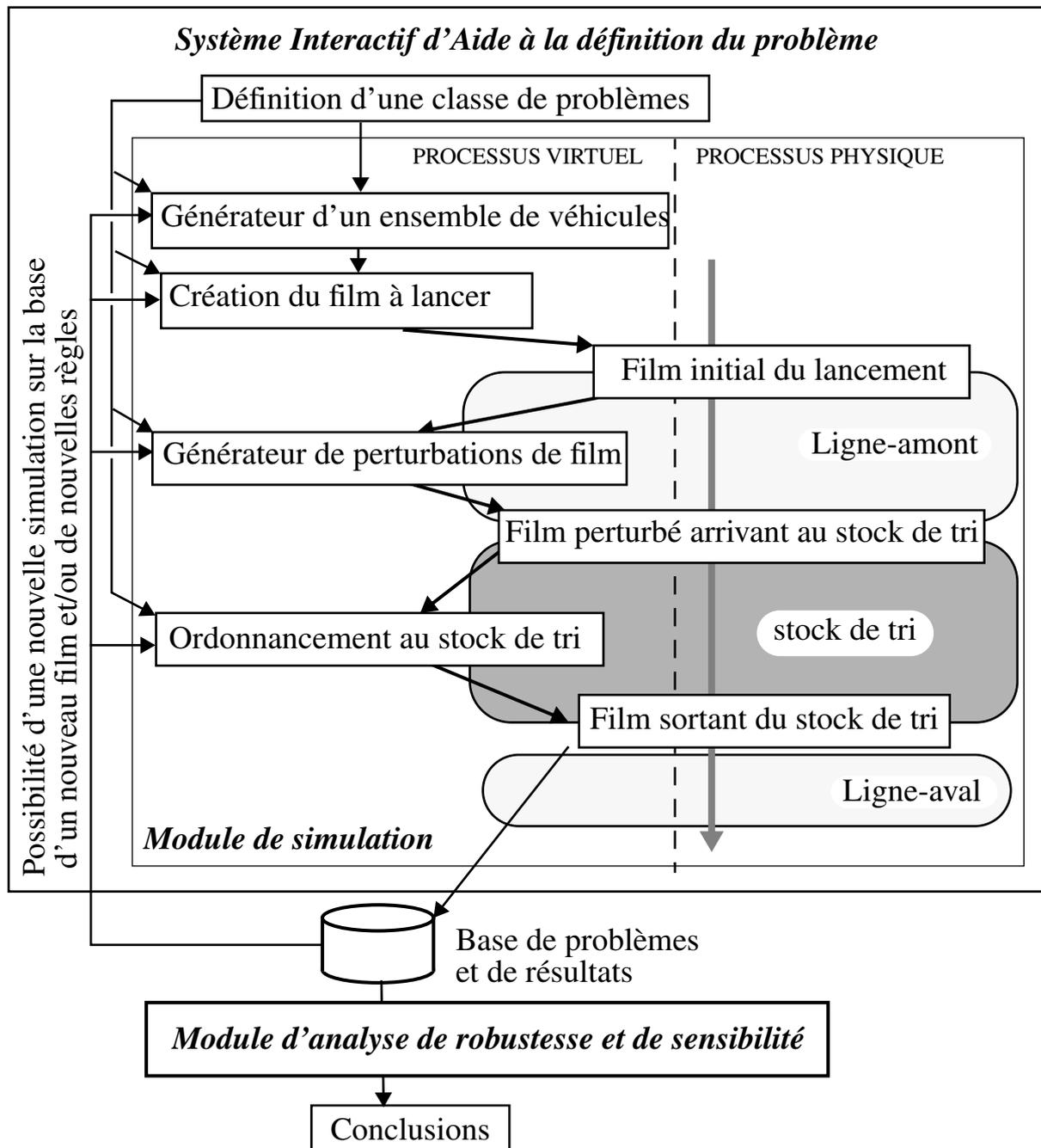
L'outil d'analyse créé est un système interactif s'appuyant sur une base de données relationnelle qui respecte les trois premières formes normales (voir [12]) et n'a donc pas de redondance informationnelle. Cette approche évite toute incohérence dans la mise à jour de la base et offre un langage de requête permettant d'obtenir les informations pertinentes souhaitées. Cette base comporte:

- l'ensemble des nomenclatures utilisées par Renault (sites, type d'options, options, etc.) et considérées comme nécessaires pour faciliter la transmission de résultats;
- une description fine des diverses configurations de contraintes, caractérisant un site à une date donnée mais transférable sur un autre site ;
- une description fine d'ensembles de véhicules, indépendants de leurs usages (jeux de contraintes utilisés, perturbations, module de et des différents films qui en sont tirés); ces ensembles peuvent être des données réelles (importées) ou des données simulées.

Un même film peut donner naissance à une famille de films, suivant une structure arborescente. Un nœud de l'arbre sépare un «film - père» d'un ou plusieurs «films - fils». Ce nœud correspond à l'usage d'un générateur d'aléas ou au module de réordonnement d'un stock de tri. Dans les deux cas, il y a transformation du séquençement. Il y a autant de «films - fils» possibles qu'il y a de paramètres différents du générateur d'aléas ou du module de réordonnement. Cette approche «généalogique» est indispensable pour l'étude de robustesse envisagée, puisqu'il s'agit de faire varier des facteurs sous contrôle. La structure de la base de donnée a été établie pour assurer la *traçabilité généalogique* des films et le système interactif permet de générer rapidement des scénarios de simulation complexes, faisant varier varier des facteurs sous contrôle.

### 3-2 Un système interactif d'aide à la définition du problème

La démarche générale retenue est celle d'un système interactif de définition d'un problème suivant les étapes décrites dans la [figure 2](#). La [figure 3](#), page 9, montre la barre de menu du logiciel de définition du problème et d'exploitation des résultats. La description du système productif se résume ici à la définition d'une série de contrainte d'espacement, à celle de perturbateurs et à celles des caractéristiques du stock de tri et de son module de réordonnancement.



*Figure 2 : Architecture du SIAD de formalisation du problème de simulation, de son exécution et d'analyse des résultats*

#### 3-2.1 Générateur d'un ensemble de véhicules

Le système permet d'importer des films réels, ce qui permet de faire du benchmarking et de crédibiliser l'approche. Ceci n'est pas suffisant car on ne pourrait alors que reconduire l'existant, sans pouvoir en identifier les limites, ni pouvoir réfléchir sur des systèmes construits de toutes pièces ou innovants dans certaines de leurs modalités de fonctionnement.



Figure 3 : organisation du système de définition du problème et d'analyse des résultats

Lorsque l'on décide de générer aléatoirement un ensemble de véhicules, on commence classiquement par définir la liste des options utilisées dans le problème, parce que jouant sur des postes critiques en variabilité de temps opératoires ou correspondant à des composants critiques (ce qu'illustre la figure 4<sup>1</sup>).

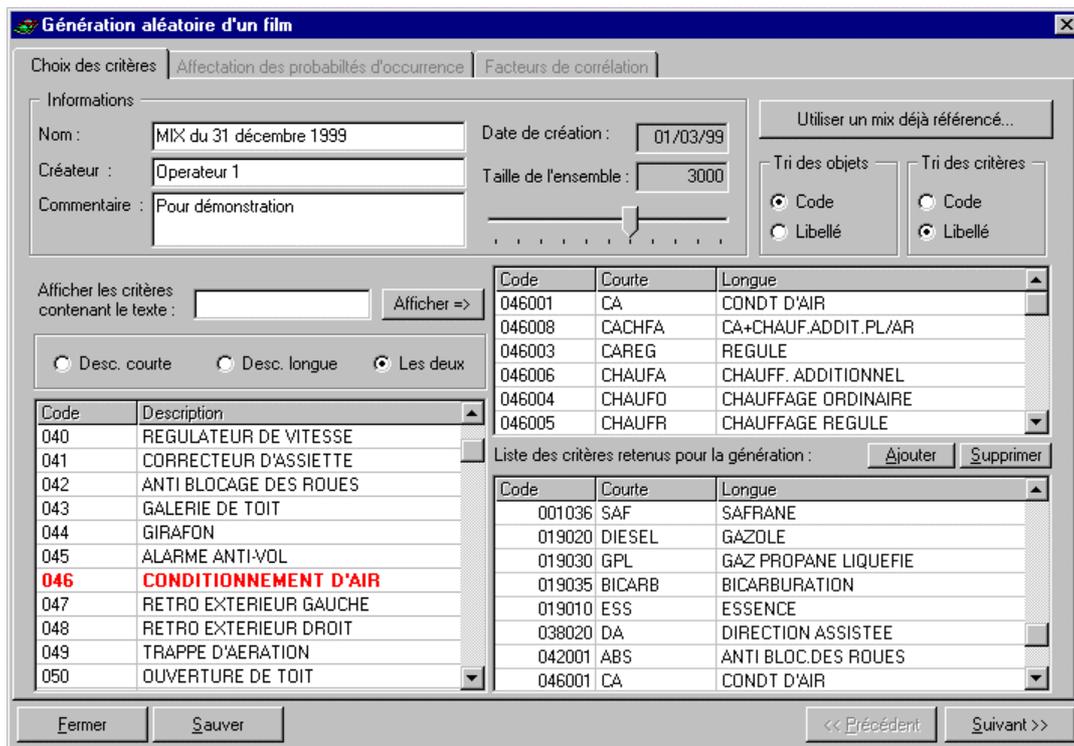


Figure 4 : définition des types d'options et options retenues

Classiquement, on tire aléatoirement, pour chaque nouveau véhicule rentrant dans l'ensemble, une option pour chaque type d'option<sup>2</sup>. Cette génération se fait habituellement en

1. La terminologie utilisée dans cet article n'est pas exactement celle utilisée chez Renault et reprise dans l'interface illustrée ici.

postulant une indépendance des options, ce qui n'est pas acceptable. Il a donc fallu mettre au point une approche permettant de lever cette hypothèse sans compliquer inutilement la saisie des informations. Ceci n'est pas complètement trivial puisqu'avec une utilisation de  $k$  types d'options, il faut théoriquement modifier un ensemble de probabilités dont le nombre est égal au produit des nombre d'options possibles de chacun des types d'option retenus. Il est évident que ce travail «dans un espace à  $k$  dimensions» n'est pas envisageable. Il a semblé réaliste, compte tenu des observations faites, de n'accepter de travailler simultanément que sur 2 ou 3 types d'options, avec quelques contraintes pour garantir la cohérence des informations :

- On commence par saisir les distributions de probabilité de chaque type d'options ; ces informations sont considérées comme définitive (voir figure 5).

Objet	Description	Critere	Courte	Longue	Probabilité
001	MODELE	001036	SAF	SAFRANE	0,1
001	MODELE	001074	KAN	KANGOO VP	0,5
001	MODELE	001560	LAG	LAGUNA	0,4
008	TYPE DE VEHICULE	008128	CMCJEP	CHRYSLER JEEP	0
008	TYPE DE VEHICULE	008230	C40	R5 3 PORTES	0
008	TYPE DE VEHICULE	008320	S48	R21 SOCIETE	0
008	TYPE DE VEHICULE	008456	V36	4x4 TRAFIC	0
019	CARBURANT	019010	ESS	ESSENCE	0,5
019	CARBURANT	019020	DIESEL	GAZOLE	0,2
019	CARBURANT	019030	GPL	GAZ PROPANE LIQUEFIE	0,2
019	CARBURANT	019035	BICARB	BICARBURATION	0,1
038	DIRECTION	038020	DA	DIRECTION ASSISTEE	0,45
042	ANTI BLOCAGE DES ROUES	042001	ABS	ANTI BLOC.DES ROUES	0,35
046	CONDITIONNEMENT D'AIR	046001	CA	COND.T D'AIR	0,6

Figure 5 : affectation des probabilités d'occurrence des options

- On continue par la détermination des probabilités croisées de chaque paire de types d'options pour lesquels on a déclaré que l'hypothèse d'indépendance n'était pas acceptable (si cette assertion vaut pour un ensemble de 3 types d'options, on privilégie de travailler d'abord sur 2 de ces options, l'introduction de la troisième s'effectuant comme montré ci-après). Pour des raisons de cohérence informationnelle, la réunion de 3 paires de types d'options liés doit comporter plus de 3 types d'options. Pour chaque paire de type d'options liées, on part du tableau de contingence des probabilités croisées calculé sur la base de l'hypothèse d'indépendance. L'utilisateur choisit alors de modifier une probabilité croisée, sous respect de contraintes de cohérence des distributions marginales et des valeurs déjà fixées<sup>1</sup> ; pour faciliter cette transformation, les deux probabilités conditionnelles correspondantes sont affichées en réponse à une modification. Ensuite, on fixe les probabilités croisées n'ayant plus de degrés de liberté. Puis, s'il reste des probabilités croi-

2. Note de la page précédente. Certains types d'option, comme celle du «toit ouvrant» ont deux options consistant en la présence ou l'absence d'une option de personnalisation (ici : «avec toit ouvrant» et «sans toit ouvrant»), ce qui fait que chaque type d'option opère une partition de l'ensemble étudié.

1. On montre, en effet que la modification d'une probabilité croisée  $p_{ij}$  pour aboutir à la valeur  $p_{ij}^*$  doit être telle que :  $\text{Max} \{0, p_i - \sum_{j''} p_{ij''}, p_j - \sum_{i''} p_{i''j}\} \leq p_{ij}^* \leq \text{Min} \{p_i - \sum_{j'} p_{ij'}, p_j - \sum_{i'} p_{i'j}\}$ , sachant que  $i''$  et  $j''$  sont tels que les probabilités croisées  $p_{ij''}$  et  $p_{i''j}$  n'ont pas été modifiées en conséquence de décisions antérieurement prises.

sées non encore fixées, on utilise une procédure restaurant la cohérence du tableau en modifiant ces probabilités sans remettre en cause les choix antérieurs faits et en s'efforçant de s'écarter le moins possible des valeurs courantes de ces probabilités croisées non encore fixées<sup>1</sup>. L'utilisateur peut alors décider de s'arrêter si le tableau obtenu lui convient, ou de poursuivre en décidant de modifier l'une des probabilités croisées non encore fixées, s'il en existe.

- On traite ensuite le cas des ensembles de 3 types d'options liés<sup>2</sup>, sachant que pour chacun, la dépendance entre 2 des trois types d'options liés a été précédemment fixée, que le tableau de contingence correspondant est une distribution marginale intangible du tableau de contingence à 3 dimensions. Dans ces conditions, on est ramené au problème précédent.

La figure 6 illustre une étape de processus de définition de la dépendance entre options.

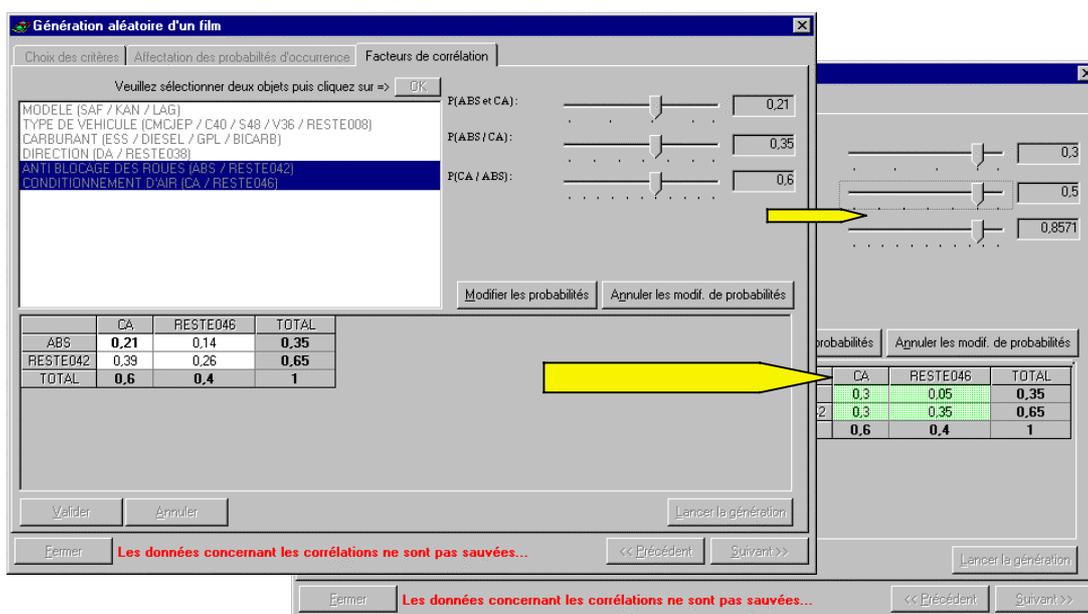


Figure 6 : saisie de la dépendance entre options

### 3-2.2 Définition opérationnelle des contraintes d'espacement

La littérature disponible décrit de manière très sommaire les contraintes d'espacement entre véhicules. Il est nécessaire de décrire ici le problème dans sa complexité réelle, que reprend le module de saisie des contraintes (illustré à la figure 7), qui permet également de créer une nouvelle configuration en partant d'une configuration existante.

Une contrainte d'espacement  $\{1/n\}$  entre deux véhicules, noté ici A et B, chacun d'entre eux étant caractérisé d'une certaine manière, impose qu'après un véhicule possédant un ensemble d'options caractérisant un véhicule de type A, on trouve au moins  $n - 1$  véhicules ne possédant pas un ensemble d'options (identique ou différent du précédent) caractérisant un véhicule de type B. Pour décrire certains problèmes, il convient de généraliser la définition de l'espacement en disant qu'un véhicule de type A peut être suivi au maximum de  $m$  véhicules de type B parmi les  $n$  véhicules qui le suivent; cette contrainte d'espacement sera notée  $\{m/n\}$ . La définition de ces ensembles d'options est plus ou moins sophistiquée.

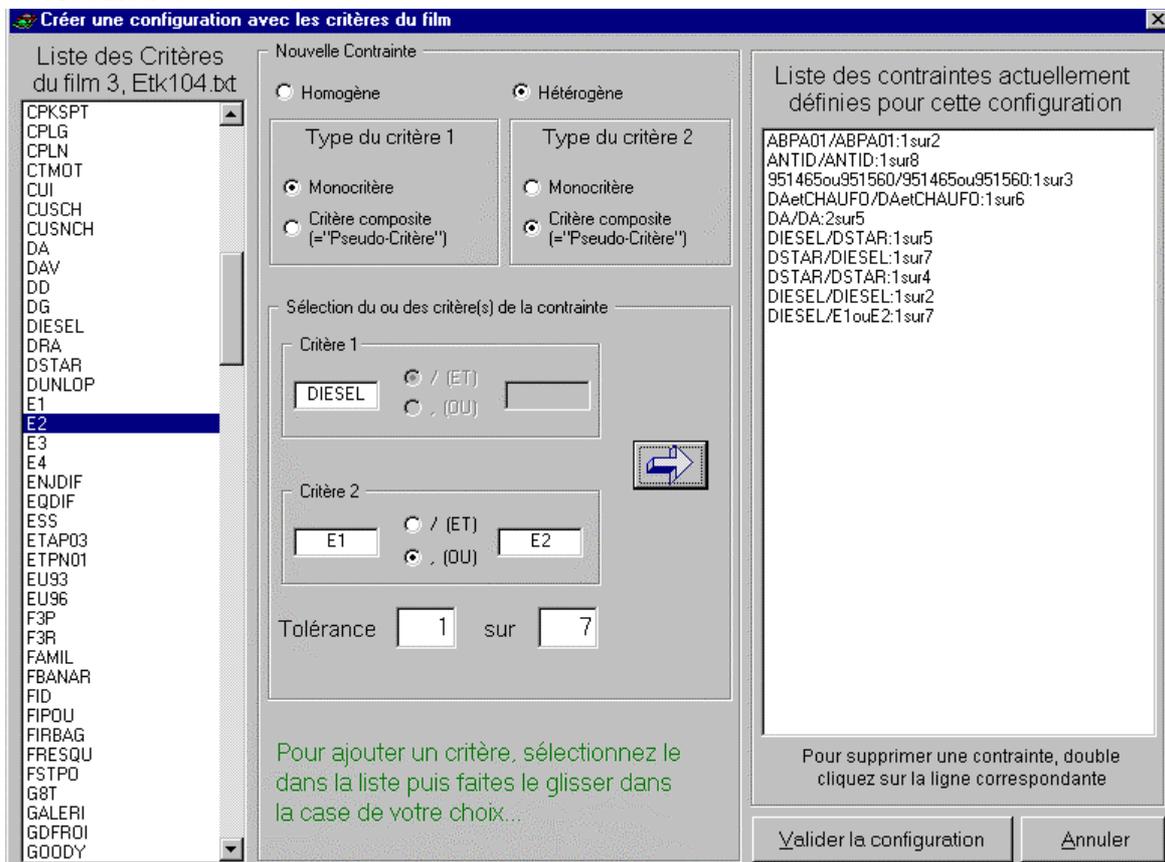
- Chaque véhicule peut être qualifié par un seul type d'options (qualification *monocritère*). Dans ce cas, le véhicule de type A est caractérisé par la présence d'une option  $\alpha_i$  choisie

1. Cette procédure est connue sous le nom de RAS et est classiquement utilisée par l'INSEE pour résoudre des problèmes de même nature sur le plan mathématique.

2. Un ensemble de 3 types d'options liés ne peut comporter les types d'options de la réunion de 2 paires de types d'options liés partageant un même type d'option et définis au cours de l'étape précédente. De la même manière, la réunion de 3 types d'options doit comporter plus de 4 types d'options.

dans le type d'options  $\alpha$  et le véhicule de type B, par la présence d'une option  $\beta_j$  choisie dans le type d'options  $\beta$ . La contrainte d'espacement est alors notée  $[\{\alpha_i \mid \beta_j\}; \{m/n\}]$ . Si les types d'options  $\alpha$  et  $\beta$  sont différents, on parlera de *contrainte hétérogène*, dans le cas contraire ( $\Rightarrow [\{\alpha_i \mid \alpha_j\}; \{m/n\}]$ ), on parlera de *contrainte homogène*. Dans ce dernier cas, on a normalement la même option pour les véhicules A et B ( $\Rightarrow [\{\alpha_i \mid \alpha_i\}; \{m/n\}]$ ). Lorsque les options des véhicules de type A et B sont différentes, on peut avoir une seconde contrainte permutant ces options et utilisant un espacement minimal différent ( $\Rightarrow [\{\beta_j \mid \alpha_i\}; \{m'/n'\}]$  ou  $[\{\alpha_j \mid \alpha_i\}; \{m'/n'\}]$ ).

- L'un des véhicules ou les deux véhicules peuvent être caractérisés par des options appartenant à plus d'un type d'options (qualification *multicritère*) mais on se limitera ici à deux. Dans ce cas, un véhicule est caractérisé par deux options  $\alpha_i$  et  $\gamma_k$  prises dans deux types d'options  $\alpha$  et  $\gamma$ , ces options étant liées par l'opérateur *et* ou par l'opérateur *ou* ( $\Rightarrow \alpha_i$  *et*  $\gamma_k$  ou  $\alpha_i$  *ou*  $\gamma_k$ ). On peut alors se trouver dans l'un des quatre cas suivants, si les deux véhicules sont caractérisés de manière multicritère :  $[\{\alpha_i$  *et*  $\gamma_k \mid \beta_j$  *et*  $\delta_h\}; \{m/n\}]$ ,  $[\{\alpha_i$  *ou*  $\gamma_k \mid \beta_j$  *ou*  $\delta_h\}; \{m/n\}]$ ,  $[\{\alpha_i$  *et*  $\gamma_k \mid \beta_j$  *ou*  $\delta_h\}; \{m/n\}]$ ,  $[\{\alpha_i$  *ou*  $\gamma_k \mid \beta_j$  *et*  $\delta_h\}; \{m/n\}]$ . Bien évidemment, on peut avoir une qualification monocritère pour un véhicule et multicritère pour l'autre. Si l'on veut caractériser un véhicule par trois options, on peut généraliser la démarche ou multiplier les contraintes, même si cette seconde solution est plus restrictive<sup>1</sup>.



1. Cette solution est souvent retenue parce que ce cas de figure est rare mais la distorsion existe bien, sauf dans le cas d'options liées visé ci-après. En effet, la contrainte  $[\alpha_i$  *et*  $\gamma_k \mid \beta_j$  *et*  $\delta_h$  *et*  $\psi_l$ ;  $\{m/n\}]$  est bien satisfaite par la triple contrainte  $[\alpha_i$  *et*  $\gamma_k \mid \beta_j$  *et*  $\delta_h/n$ ],  $[\alpha_i$  *et*  $\gamma_k \mid \beta_j$  *et*  $\psi_l$ ;  $\{m/n\}]$  et  $[\alpha_i$  *et*  $\gamma_k \mid \delta_h$   $\psi_l$ ;  $\{m/n\}]$ , mais il est évident que la première de ces trois contraintes (choisie arbitrairement pour l'exemple) empêche de faire suivre un véhicule de type A caractérisé par les options  $\alpha_i$  *et*  $\gamma_k$ , par un véhicule de type B caractérisé par les options  $\beta_j$  *et*  $\delta_h$  *et*  $\psi_l$ , avec  $l \neq l'$ . Bien évidemment, si les trois options sont liées, c'est-à-dire qu'elles apparaissent nécessairement simultanément, deux des trois contraintes suffisent à décrire correctement le problème posé.

### 3-2.3 Création du film au lancement

Il s'agit de proposer un ordonnancement initial pour l'ensemble de véhicules. Dans la réalité, un logiciel sophistiqué de programmation linéaire est utilisé par Renault et qu'il n'est pas envisageable de l'interfacer avec ce logiciel.

On a donc retenu d'adapter des heuristiques de réordonnement à la sortie du stock de tri, notamment en considérant que l'on est en présence d'un stock ayant la taille de l'ensemble initial à ordonner. Cette solution permet de fournir un séquençage de niveau satisfaisant. Si nécessaire, les possibilités d'export et d'import permettent d'utiliser le logiciel d'ordonnement effectivement utilisé.

### 3-2.4 Générateur de perturbations de séquençement

Ce générateur (illustré à la [figure 8, page 13](#)), utilisable en cascade si on le désire, offre quelques distributions du nombre de places perdues pour un véhicule tiré aléatoirement comme devant faire l'objet d'un décyclage. Les distributions offertes sont classiques (linéaire, triangulaire, normale, fonction de répartition empirique).

Figure 8 : saisie des caractéristiques d'un perturbateur de séquençement

### 3-2.5 Module de réordonnement du stock de tri

Ce module de réordonnement reproduit fidèlement les règles actuellement utilisées dans la gestion des stocks de tri à accès direct, avec leurs possibilités de paramétrage. Dans ce module on détermine également la taille du stock de tri désirée (ce qui permet de faire des études sur l'influence de la taille de ce stock).

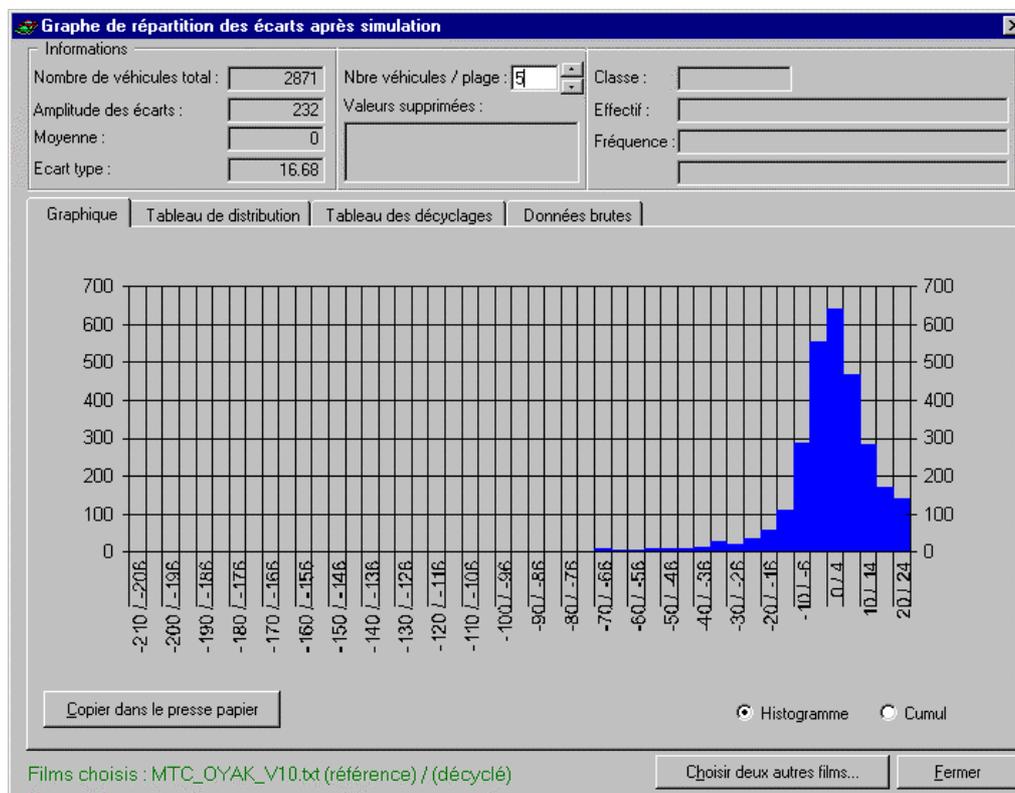
## 3-3 Un module d'exploitation des résultats

Ce module comporte deux volets, seul le premier étant complètement achevé à ce jour. Il s'agit d'abord de pouvoir comparer deux films quelconques ayant un même ancêtre commun (voir § 3-1, page 7). Il s'agit ensuite de pouvoir traiter globalement une famille de films se différenciant par la variation d'un facteur sous contrôle.

La comparaison de deux films passe d'abord par une possibilité d'analyse détaillée sur laquelle on ne s'étendra pas mais qui est indispensable lorsque l'un des deux films est tiré du

premier après passage dans un stock de tri. En effet, cette traçabilité fine est nécessaire pour pouvoir reconstituer « pas à pas » les séquences décisionnelles précédant le moment où une violation de contrainte est devenue inévitable, cette compréhension du comportement d'heuristiques étant une condition de leurs améliorations.

Bien évidemment, cette comparaison se traduit par la création de courbes de décyclage (illustré à la [figure 9](#)) et d'indicateurs de violations de contraintes.



*Figure 9 : Courbe de décyclage comparant deux films*

Pour l'étude des stocks de sécurité, qui ne fait que débiter, le principe retenu est de travailler sur un film initial assez long (quelques milliers de véhicules) et de tirer aléatoirement un échantillon suffisamment important<sup>1</sup> de dates de début de période de gestion calendaire (date repérée par un nombre de cycles de base écoulés depuis le lancement du premier véhicule dans le film et période calendaire exprimée en nombre de cycles de base). La comparaison doit s'effectuer entre le film initial et celui qui sort du stock de tri qui précède le sous-système productif où se trouve les postes de consommation de l'option considérée. Sur chaque période tirée, il faut calculer la différence entre la demande prévisionnelle (découlant du film initial) et la demande effective (découlant du film à la sortie du stock de tri). La rupture de stock est alors nulle si cette différence est négative ou nulle et, dans le cas contraire, elle est égale à cette différence. La distribution de probabilité qui en résulte est alors utilisable pour dimensionner le stock de sécurité de l'option considérée. Il convient de noter que ces résultats ne sont pas indépendants du degré de saturation des contraintes et des algorithmes de réordonnancement.

Les résultats obtenus par ces approches ont conduit Renault à poursuivre dans cette voie.

1. Quelques milliers, voire un peu plus si l'on s'intéresse à une option coûteuse rarement demandée.

## 4 Bibliographie

- [1] J. **Bard**, E. **Dar-El** & A. **Shtub**, «An analytic framework for sequencing mixed model assembly lines», *International Journal of Production Research*, vol. 30, 1992.
- [2] J. **Bautista**, R. **Companys**, A. **Corominas**, «Heuristics and exact algorithms for solving the Monden Problem», *European Journal of Production Research*, n° 88, p. 101-113, 1996.
- [3] A. **Bolat**, M. **Savsar**, M **Al-Fawzan**, 1994, «Algorithms for real-time scheduling of jobs on mixed model assembly lines», *Computer Operations Research*, vol. 21, n° 5, p. 487-498
- [4] E. **Castelain**, M. **Delaval**, H. **Ohl**, J.-C. **Gentina**, J.-C. **Riat**, P.-A. **Yvars**, «Algorithmes de cadencement réactif des véhicules en entrée de ligne de montage automobile», *Revue d'automatique et de productique appliquées*, vol. 8, n° 5, p. 663-682.
- [5] L. **Cheng** & F.-Y. **Ding**, 1996, «Modifying mixed-model assembly line sequencing methods to consider weighted variations for Just-In-Time production systems», *IIE Transactions*, vol. 28, p. 919 à 927.
- [6] R. W. **Conway**, W. L. **Maxwell** & L. W. **Miller**, 1967, *Theory of scheduling*, Addison-Wesley.
- [7] D. F. **Cooper**, 1976, «Heuristics for scheduling resource-constrained project: an empirical investigation», *Management Science*, vol. 22, n° 11, p. 1186 - 1194.
- [8] Y. **Dallery** & S. B. **Gershwin**, «Manufacturing flow system: a review of models and analytical results», *Queuing Systems*, vol. 12, p. 3 - 94
- [9] D. G. **Dannenbring**, 1977, «an evaluation of Flow Shop Sequencing Heuristics», *Management Science*, vol. 23, p. 1174 - 1182.
- [10] E. **Duplaca**, C. K. **Han**, D. **Hur**, 1996, «Mixed-model assembly line sequencing at Hyundai motor company», *Production and inventory management journal*, 3° trimestre 1996, p. 20 à 26.
- [11] T. **Feare**, 1998, «GM runs in top gear with as/rs sequencing», *Modern Material Handling*, Vol. 53, n° 9, p. 50-52.
- [12] A. **Flory** & F. **Laforest**, 1997, *Bases de données relationnelles*, Economica.
- [13] T. D. **Fry**, M. D. **Oloff**, E. D. **Minor** & G. K. **Leong**, 1989, «The effects of product structure and sequencing rule on assembly shop performance», *International Journal of Production Research*, vol. 27, n° 4, p. 671-686.
- [14] V. **Giard**, 1997, *Processus productifs et programmation linéaire*, Economica.
- [15] R. R. **Inman** & R. L. **Bulfin**, 1991, «Sequencing JIT mixed-model assembly lines», *Management Science*, Vol. 37, n°7, p. 901-904.
- [16] S. H. **Joo** & W. E. **Wilhelm**, 1993, «A review of quantitative approaches in just-in-time manufacturing», *Production Planning and Control*, vol. 4, p. 207-222.
- [17] R. **Koether**, 1985, «Improving productivity in Model-Mix Assembly», *Toward the Factory of the Future: Proceedings of the Eighth International Conference of Production Research* (H. Bullinger & H. Warnecke ed.), Springer, p. 761-766, cité par **Rachamadugu & Yano** [26].
- [18] W. **Kubiak**, 1993, «Minimizing variation of production rates in just-in-time systems: A survey», *European Journal of Operational Research*, vol 66, p. 259-271.
- [19] W. **Kubiak** & S. **Sethi**, 1991, «A note on “Level Schedules for mixed-models assembly lines in just-in-time production system”», *Management Science*, vol. 37, p. 121-122.

- [20] I. S. **Kurtulus** & E. W. **Davis**, 1982, Multiproject scheduling; categorization of heuristic rule performance», *Management Science*, vol. 28, n° 2, p. 161-172.
- [21] J. **Miltenburg**, 1989, «Level Schedules for mixed-models assembly lines in just-in-time production system», *Management Science*, vol. 35, p. 192-207.
- [22] J. **Miltenburg** & G **Sinnamon**, 1989, «Scheduling mixed-model multi-level just-in-time production system», *International Journal of Production Research*, vol. 27, n° 9, p. 1487-1509.
- [23] Y. **Monden**, 1998, *Toyota Production System - an Integrated Approach to Just-In-Time*, 3° ed. (1° édition en 1983), Engineering & Management Press, Norcross, Georgia, USA.
- [24] S. Y. **Nof**, W. E. **Wilhelm** & Hans-Jürgen **Warnecke**, 1997, *Industrial assembly*, Chapman & Hall.
- [25] S. S. **Panwalker** & W. **Iskander**, 1977, «A survey of scheduling rules», *Operations Research*, vol. 25, p. 45-61.
- [26] R. M. **Rachamadugu** & C.A. **Yano**, 1994, «Analytical tools for assembly line design and sequencing», *IIE Transaction*, Vol. 26, n° 2, mars 1994, p. 2-10.
- [27] N.T. **Thomopoulos**, 1967, «Line balancing - sequencing for mixed model assembly», *Management Science*, vol. 14, n° B, p. 59-75.
- [28] N.T. **Thomopoulos**, 1970, «Mixed-model balancing with smoothed station assignments», *Management Science*, vol. 19, n° 9, p. 593-603.
- [29] G. **Ülüsoy** & L. **Özdamar**, «Heuristic performance and network/resource-constrained project scheduling», *Journal of Operationnal Research Society*, vol. 20, n° 12, pp. 1145-1152.
- [30] C. A. **Yano** & A. **Bolat**, 1989, «Survey, development and application of algorithms for sequencing paced assembly lines», *J Mfg Oper. Mgmt*, vol 3, p. 172-198.
- [31] C. A. **Yano** & A. **Bolat**, 1992, «Scheduling algorithms to minimize utility work at a single station on a paced assembly line», *Production Planning And Control*, vol 3, p. 393-405.

**1999.05**

**Analyse de la robustesse des  
ordonnancements/réordonnancements sur ligne de  
production et d'assemblage dans l'industrie  
automobile**

**François Danjou<sup>1</sup>, Vincent Giard<sup>2</sup>, Étienne Le Roy<sup>3</sup>**

1. Chercheur doctorant à l'IAE de Paris, 2. Professeur à l'IAE de Paris,
3. Direction de l'ingénierie véhicule de Renault

Les papiers de recherche du GREGOR sont accessibles  
sur INTERNET à l'adresse suivante :

<http://www.univ-paris1.fr/GREGOR/>

Secrétariat du GREGOR : Claudine DUCOURTIEUX (Ducourtieux.IAE@univ-paris1.fr)

