



HAL
open science

Le problème du Car Sequencing RENAULT et le Challenge ROADEF'2005

Alain Nguyen, Van-Dat Cung

► **To cite this version:**

Alain Nguyen, Van-Dat Cung. Le problème du Car Sequencing RENAULT et le Challenge ROADEF'2005. Premières Journées Francophones de Programmation par Contraintes, CRIL - CNRS FRE 2499, Jun 2005, Lens, pp.3-10. inria-00000091

HAL Id: inria-00000091

<https://inria.hal.science/inria-00000091>

Submitted on 26 May 2005

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Le problème du Car Sequencing RENAULT et le Challenge ROADEF'2005

Alain NGUYEN¹

Van-Dat CUNG²

¹ RENAULT – Pôle Optimisation pour le Commerce et la Logistique,
Direction des Technologies et Systèmes d'Information Renault Novadis,
13 avenue Paul LANGEVIN, 92359 Le Plessis Robinson, France.

² Laboratoire GILCO, ENSGI-INPG,
46, avenue Félix-Viallet, 38031 Grenoble Cedex 1, France.
alain.nguyen@renault.com Van-Dat.Cung@gilco.inpg.fr

Résumé

L'ordonnement des véhicules sur les chaînes de montage est une problématique ancienne et (NP-)difficile chez RENAULT : elle est traitée par une application d'optimisation (fondée sur le recuit simulé) depuis 1993. Mais cette problématique a pris une acuité particulière ces dernières années suite aux choix stratégiques de l'entreprise (respect absolu en chaîne de l'ordonnement prévisionnel), d'où la volonté de RENAULT de présenter ce problème au challenge ROADEF'2005 (Société Française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision¹) pour explorer les algorithmes les plus prometteurs.

Cet ordonnancement se distingue du problème « classique » du Car Sequencing de la littérature dans la mesure où il prend en compte à la fois les impératifs d'espacement de véhicules complexes au montage et la nécessité de constituer des rafales de couleur pour minimiser la consommation des solvants dans l'atelier peinture.

Nous présentons dans cet article le problème soumis aux candidats du challenge, ainsi qu'une analyse des méthodes utilisées par les 27 équipes (un record de participation !). Nous évoquerons pour conclure les extensions au problème, qui vont être étudiées dans la suite du challenge.

Abstract

Car sequencing on the assembly lines is an old NP-hard problem at RENAULT : it has been solved by an optimization application (based on simulated annealing) since 1993. But this problem has become particularly sensitive these last years following the strategic choices

of the company (absolute respect in the estimated scheduling), this is why RENAULT submitted this problem to the ROADEF'2005 challenge (French Society of Operations Research and Decision-Making Aid) in order to explore the most promising algorithms.

This scheduling differed from the « traditional » Car Sequencing problem of the literature insofar as it takes into account both the requirements of spacing of complex vehicles to assembly and the need for constituting paint batches to minimize the consumption of solvents in the painting workshop.

We present in this article the problem submitted to the candidates of the challenge, as well as an analysis of the methods used by the 25 teams (a record of participation!). We will evoke to conclude the extensions to the problem, which will be studied after the challenge.

1 Description de la problématique métier

1.1 La planification et l'ordonnement véhicules chez RENAULT

Les commandes clientes sont transmises en temps réel aux usines de montage. La tâche quotidienne des usines est (1) d'affecter une journée de fabrication à chaque véhicule commandé en fonction des contraintes capacitaires des lignes de fabrication et des délais promis aux clients. Il s'agit ensuite (2) d'ordonner les véhicules à l'intérieur de chaque journée de fabrication, en satisfaisant au mieux les besoins respectifs des ateliers de la ligne de fabrication : ateliers de tôlerie, peinture et montage. La séquence de véhicules

¹www.roadef.org

calculée constitue le « film » qui sera envoyé à la fabrication.



On se focalisera sur les besoins des ateliers de peinture et de montage, considérant que l'atelier de tôlerie ne génère pas d'impératifs sur l'ordonnement de chaque journée.

Lors de l'ordonnement de chaque journée, on ne remet plus en cause la composition des journées décidée à l'étape (1).

Une application opérationnelle chez RENAULT gère ce processus de planification/ordonnement, en utilisant la Programmation Linéaire pour l'étape (1) et le recuit simulé pour l'étape (2).

1.2 Besoins de l'atelier peinture

Le besoin de l'atelier peinture est de minimiser la consommation de solvant, lequel solvant est utilisé pour purger les pistolets de peinture à chaque changement de teinte dans le film véhicules.

On cherche donc à « grouper » les véhicules de même couleur, ce qui revient à minimiser le nombre de purges, c-à-d le nombre de changements de teintes dans le film ; ou encore à générer les rafales de peinture les plus longues possibles.

Mais chaque rafale de teintes ne doit pas dépasser une longueur maximale, car il faut périodiquement purger les pistolets de peinture, même s'il n'y a pas eu de changement de teinte. Cette longueur maximale des rafales de couleur est une **contrainte dure**.

1.3 Besoins de l'atelier montage

Afin de lisser la charge de travail sur les différents postes en bord de chaîne, on cherche à « écarter » les véhicules « difficiles », c-à-d ayant des équipements nécessitant des opérations lourdes. En d'autres termes, on cherche à limiter la densité des véhicules difficiles pour ne pas surcharger les postes de travail concernés par l'assemblage de ces véhicules.

Ce besoin d'écartement est formalisé par une **contrainte de ratio N/P** . La contrainte porte sur une caractéristique technique qui nécessite des opérations lourdes (par exemple, le toit ouvrant, la climatisation, etc.).

La contrainte de ratio N/P signifie qu'on ne doit pas trouver une densité supérieure à N/P de véhicules concernés par la contrainte de ratio. Par exemple, si $N/P=3/5$, on ne doit pas trouver plus de 3 véhicules

concernés par la contrainte de ratio dans toute séquence de cinq véhicules dans le film.

Lorsque $N=1$, cela signifie que deux véhicules concernés par la contrainte de ratio $1/P$ doivent être séparés par au moins $P-1$ positions dans le film. **Exemple** : contrainte de ratio $1/5$ et séquence respectant ce ratio « X _ _ _ X », X=véhicule concerné par la contrainte de ratio.

Les contraintes de ratio sont des **contraintes molles** : on ne peut pas savoir a priori si l'ensemble des contraintes de ratio peut être satisfait lorsqu'on ordonnance une journée de fabrication. L'objectif de l'optimisation consiste donc à minimiser le nombre de violations des contraintes de ratio.

2 Formalisation du problème d'optimisation

2.1 Contraintes de ratio prioritaires et non prioritaires

Même si le problème « classique » du Car Sequencing décrit dans la littérature ne concerne que les contraintes de ratio, l'ordonnement des véhicules chez RENAULT a toujours intégré les deux dimensions « contraintes de ratio » et « rafales de couleur », d'une part parce que c'est la même séquence de véhicules qui doit traverser les deux ateliers, peinture et montage ; d'autre part parce qu'il y a des arbitrages à faire entre ces deux objectifs.

En effet, dans les pays à coût de main d'œuvre élevé, les usines vont privilégier l'optimisation des contraintes de ratio, puisqu'il s'agit de minimiser les effectifs affectés en bord de chaîne. Inversement, avec un taux horaire plus faible, il peut être avantageux de privilégier l'optimisation des rafales de peinture car les gains en solvants pourront compenser l'engagement d'effectifs supplémentaires aux postes de travail du montage.

Pour faciliter cet arbitrage entre le montage et la peinture, nous avons défini deux catégories de contraintes de ratio, les prioritaires et les non prioritaires. Les contraintes de ratio prioritaires correspondent à des contraintes « lourdes » de l'atelier de montage, les non prioritaires étant associées à des opérations plus légères où on cherche simplement à lisser la charge de travail. Les usines à coût de main d'œuvre élevé, tout en privilégiant les contraintes de ratio sur les rafales de couleur, peuvent ainsi définir un sous-ensemble de ratios prioritaires dont la satisfaction prime sur les rafales de peinture, et un autre sous-ensemble de ratios non prioritaires dont la satisfaction passe après l'optimisation des rafales de couleur.

2.2 Comptabilisation des violations de contraintes de ratio

Nous avons écrit précédemment que les contraintes de ratio sont des contraintes « molles », dont le respect absolu n'est pas toujours possible. En effet, les fabricants peuvent déclarer un ratio $1/N$ sur-contraint (par exemple un ratio $1/3$ alors que le pourcentage de véhicules concernés est de 40%), avec la sémantique suivante : il faut écarter les véhicules autant que possible à $1/N$, et pour les quelques véhicules où on n'y parvient pas, essayer de les écarter à $1/(N-1)$, puis $1/(N-2)$, etc.

On essaie d'obtenir cet « écartement » en comptabilisant les contraintes de ratio sur des fenêtres glissantes sur tout le film. Moins les véhicules seront écartés et plus nombreuses seront les violations, car la violation avec des véhicules moins écartés sera comptabilisée dans davantage de fenêtres glissantes, et le nombre de violations sera plus élevé dans chacune de ces fenêtres glissantes.

Exemple : pour une contrainte de ratio de $1/5$, on comptabilise les violations avec des fenêtres glissantes de taille 5

— — — X — — — X : 1 violation sur la fenêtre glissante
— — — [X — — — X],
— — — X — — — X : 2 violations sur les fenêtres glissantes
— — — [— X — — — X] et — — — [X — — — X].

Définition : Le nombre de violations comptabilisées sur une fenêtre glissante est égal à :

- * (nombre de véhicules de la fenêtre glissante concernés par le ratio) – (numérateur du ratio), si (nombre de véhicules de la fenêtre glissante concernés par le ratio) > (numérateur du ratio);
- * zéro sinon.

Cette méthode de comptabilisation s'applique à la fois aux contraintes de ratio $1/P$ et N/P ($N \neq 1$).

2.3 Optimisation multi-critères lexicographique

Il s'agit de construire une séquence de véhicules qui optimise la satisfaction des besoins des ateliers peinture et montage, ce qui se traduit par l'optimisation des trois critères (ratios prioritaires, ratios non prioritaires, purges de peinture), du plus prioritaire au moins prioritaire, et **sans compensation** entre les critères. Selon les usines, on peut trouver l'une des trois configurations suivantes :

1. minimiser le nombre de violations des contraintes de ratio prioritaires,
2. minimiser le nombre de purges de peinture,
3. minimiser le nombre de violations des contraintes de ratio non prioritaires ;

ou

1. minimiser le nombre de violations des contraintes de ratio prioritaires,
2. minimiser le nombre de violations des contraintes de ratio non prioritaires,
3. minimiser le nombre de purges de peinture ;

ou

1. minimiser le nombre de purges de peinture,
2. minimiser le nombre de violations des contraintes de ratio prioritaires,
3. minimiser le nombre de violations des contraintes de ratio non prioritaires.

Il ne doit **pas y avoir compensation** entre les objectifs : la résolution de l'objectif de rang $O+1$ ne doit pas dégrader le résultat de l'objectif de rang O . Pour garantir cette non compensation des objectifs dans la notation des solutions produites par les candidats, nous avons utilisé les pénalités de 10^6 , 10^3 et 1 respectivement pour les résultats du premier, second et troisième objectif.

3 Le Challenge ROADEF'2005

Le problème du Car Sequencing tel que décrit précédemment est traité par une application opérationnelle chez RENAULT depuis une dizaine d'années avec un algorithme de recuit simulé [1]. Mais cette problématique a pris une acuité particulière ces dernières années suite aux choix stratégiques de l'entreprise d'imposer un respect absolu en chaîne de l'ordonnancement prévisionnel (réalisé 6 jours avant la fabrication effective). Jusqu'à ces dernières années, la séquence de véhicules pouvait être triée localement en entrée de l'atelier de peinture pour améliorer les rafales de couleur (sans tenir compte des contraintes de ratio), puis re-triée en entrée de l'atelier de montage pour « rattraper » la dégradation des contraintes de ratio occasionnée en entrée peinture. Le respect strict de l'ordonnancement prévisionnel interdit désormais ces tris locaux. La qualité de la séquence prévisionnelle est donc devenue critique.

Dans ce contexte, le challenge ROADEF a représenté une opportunité exceptionnelle pour RENAULT de faire une évaluation des algorithmes les plus prometteurs pour cette problématique d'ordonnancement.

3.1 Description des scénarii

Les scénarii fournis sont tous issus des usines de montage RENAULT. Certains ont vu leurs contraintes de ratio « durcies » ou l'ordre des objectifs modifié pour tester de nouvelles configurations. Avec les instances de données ont été transmis aux candidats les solutions produites par l'application de RENAULT.

Trois bases ont été utilisées pendant le challenge :

Base A : Cette première base (composée de 16 instances) a servi de première référence de travail pour les candidats pendant la phase de qualification du challenge. Elle a été construite à partir d'un panel de six usines (une à deux instances par usine). Un classement intermédiaire a été établi sur les résultats de la base A, afin de permettre aux équipes de se situer entre elles.

Base B : Cette seconde base (constituée de 45 instances) a permis aux candidats de peaufiner leurs algorithmes pendant la phase finale du challenge. Elle a été construite à partir des données de dix usines, chaque jeu de donnée usine étant représenté dans les trois configurations possibles en termes d'ordre des objectifs d'optimisation. Cela permet de tester les algorithmes des candidats dans la configuration existante des usines, et dans les futures configurations cibles. Par ailleurs, certaines usines ont vu leurs ratios sur-contraints afin de mettre en évidence les propriétés de « lissage » des algorithmes des équipes : nous voulions savoir si les algorithmes « écartaient » bien les véhicules contraints pour les ratios non satisfaisables.

Base X : Cette base finale (contenant 19 instances) était inconnue des équipes participantes jusqu'à la fin du challenge et elle a servi au classement final. Cette base reflète les données des 19 chaînes de montage RENAULT et DACIA en Europe et au Mercosur, chaque instance représentant une journée de fabrication sur l'une de ces lignes d'assemblage.

A titre d'information, la taille des instances de la base X :

Inst.	#véh.	#r.prio.	#r.n.prio.	#coul.
022	704	3	2	13
023	1260	4	6	13
024	1319	7	7	15
025	996	6	12	19
028_1	325	8	15	15
028_2	65	1	5	4
029	780	4	2	14
034_VP	931	3	4	10
034_VU	231	3	2	7
035_1	90	1	0	6
035_2	376	2	0	7
039_1	1247	0	10	15
039_3	1037	2	9	17
048_1	519	6	14	13
048_2	459	8	10	13
064_1	875	7	2	13
064_2	273	3	0	12
655_1	264	4	1	9
655_2	219	4	0	7

3.2 Description des méthodes utilisées par les candidats

Nous présentons un certain nombre d'éléments sur les méthodes utilisées par les candidats, en se basant sur les présentations des candidats finalistes lors du congrès ROADEF'2005 à Tours, et sur les descriptions de méthodes remises par les équipes à la fin de la phase de qualification.

3.2.1 Les familles d'algorithmes utilisés

Une première synthèse des algorithmes utilisés donne la répartition suivante pour les 27 équipes candidates ayant rendu un programme à la fin de la phase de qualification :

Algorithmes	#éq.
Heuristiques Constructives (HC)	Ttes
Recuit Simulé (RS)	5
Recherche Tabou (RT)	7
Recherche à Voisinage Variable (RVV)	4
Recherche à Voisinage Large (RVL)	2
Rech. Locale sans méta. particulière (RL)	5
Recherche Locale Itérée (RLI)	2
Algorithme Génétique (AG)	1
Colonie de Fourmis (CF)	1
Prog. Linéaire en Nombres Entiers (PLNE)	1
Prog. Par Contraintes (PPC)	1

Les méthodes utilisées par les équipes finalistes dans l'ordre croissant du classement final sont :

Rg.	Algorithme	Équipe
1	HC+RL	Estellon, Gardi & Nouioua
2	HC+RVV+RLI avec relance	Aloise, Noronha, Rocha, Ribeiro & Urrutia
3	HC+RS	Briant, Naddef & Mounié
4	HC+RS	Bloemen
5	HC+RS	Kuipers
6	HC+RL	Gravranovic
7	RT	Cordeau, Laporte & Pasin
8	HC+RVV+RS	Riesler, Chiarandini, Paquete, Schiavinotto & Stütze
9	HC+RT	Craciunas, Gendreau & Potvin
10	HC+RL	Pawlak, Rucinski, Piechowiak, Plaza
11	CF+RL+RT/RVV	Gravel, Gagné, Price, Krajecki & Jaillet
12	HC+RL	Benoist

Le total des méthodes utilisées est supérieur au nombre de candidats, car certaines équipes ont combiné plusieurs algorithmes. La 2ème équipe du classement final a par exemple mis en place 6 heuristiques constructives et plusieurs combinaisons de recherches locales à voisinage variable et/ou itérées selon l'ordre de traitement des trois objectifs !

Nous constatons également une grande prédominance des méthodes de recherche locale et une grande

attention des équipes sur les opérateurs de voisinage et les stratégies d'exploration de l'espace de recherche (arbitrage entre intensification et diversification, sortie des optima locaux).

Les méthodes plus « rares » (AG, CF, PLNE) sont le fait d'équipes spécialisées dans ces techniques et qui ont tenu à démontrer le potentiel de ces algorithmes sur le problème du Car Sequencing.

Un cas particulier : l'équipe vainqueur (Estellon, Gardi et Nouioua) a développé un algorithme de recherche à voisinage large à base de PLNE pour la phase de qualification (avec des résultats mitigés dus principalement au temps de calcul imparti de 10 minutes) avant de basculer sur de la recherche locale avec des voisinages plus classiques pour les phases suivantes du challenge.

3.2.2 Heuristiques constructives

Toutes les équipes ont construit des solutions initiales avec une heuristique pour les instances comportant l'objectif des rafales de couleur en premier objectif. C'est logique puisqu'il existe une méthode assez simple pour construire une solution optimale en termes de rafales de couleur, sans tenir compte des contraintes de ratio.

La très grande majorité des équipes a également développé des heuristiques constructives pour déterminer des solutions initiales pour les autres instances (comportant l'objectif des contraintes de ratio en premier). Cela permettait aux équipes de disposer généralement d'une solution initiale de meilleure qualité que la solution de RENAULT. A noter : Yves Caseau a eu recours à la PPC pour construire cette solution initiale. C'est le seul candidat à avoir utilisé la PPC.

3.2.3 Les opérateurs de voisinage

Les meilleurs candidats ont utilisé l'ensemble des opérateurs de voisinage décrits dans [3], ainsi que des variantes (la liste n'est pas exhaustive !) :

Insert forward/backward : Insérer un véhicule avant ou après une position j donnée.

Swap : Permuter deux véhicules différant sur au moins un ratio ou sur la couleur.

SwapS : Permuter deux véhicules différant sur une seule caractéristique.

SwapT : Permuter deux véhicules consécutifs.

Invert : Inverser une séquence de véhicules.

Shuffle : Perturber aléatoirement une séquence de véhicules.

Group swap : Permuter 2 séquences de véhicules.

K swap : Permuter K couples de véhicules.

Group insert : Insérer une séquence de véhicules à une position j donnée.

Invert same type : Inverser une séquence de véhicules, dont les deux bornes de la séquence sont des véhicules de même couleur, ou équivalents pour les ratios prioritaires, ou constituant des bornes de rafales de même couleurs ou de couleurs différentes.

L'opérateur « Shuffle » a été utilisé avec parcimonie parce qu'il est coûteux en évaluation, mais il peut permettre une bonne diversification de l'exploration. L'équipe vainqueur (Estellon, Gardi et Nouioua) a remarqué que l'opérateur « SwapT » s'est révélé très performant à la fois pour améliorer localement une solution (en évitant de trop la perturber) et en performances car les véhicules consécutifs se trouvant majoritairement en mémoire cache, le temps d'évaluation en était considérablement amélioré.

3.2.4 Traitement du multi-objectifs et quelques résultats numériques

La plupart des équipes ont adopté la stratégie suivante de traitement du multi-objectifs :

1ère étape : l'algorithme se concentre uniquement sur le 1er objectif.

2ème étape : l'algorithme se concentre sur le 1er et le 2ème objectifs, mais sans dégrader la qualité du 1er objectif obtenue à la 1ère étape.

3ème étape : les trois objectifs sont pris en compte, en interdisant la dégradation sur les deux premiers objectifs obtenus à la 2ème étape.

Les candidats ont réparti le temps de calcul alloué (10 minutes sur un Pentium IV – 1,6 Ghz et 1 Go de mémoire) entre les 3 étapes. Compte tenu de cette stratégie et de la qualité des algorithmes développés, les meilleures équipes ne se sont départagées que sur les 2ème et 3ème objectifs, obtenant les mêmes résultats sur le 1er objectif.

Mais ces écarts sur les objectifs secondaires ne sont pas mineurs ! En effet, la majorité des instances comportent la configuration dans l'ordre : (1) ratios prioritaires, (2) rafales peinture, (3) ratios non prioritaires. Les écarts entre les meilleures équipes sur le 2ème objectif (à résultat équivalent sur le 1er objectif) ont un impact économique non négligeable, puisqu'il s'agit de consommations de solvants. Les écarts sur le 3ème objectif (ratios non prioritaires) relèvent davantage du qualitatif.

Le tableau suivant donne les résultats des trois premières équipes du classement final sur la base X avec l'ordre des objectifs de chaque instance : P_NP_R signifie que l'objectif 1 est les ratios

prioritaires (P), l'objectif 2 les ratios non prioritaires (NP) et l'objectif 3 les purges dans les rafales de peintures (R). Les valeurs des trois objectifs sont des moyennes sur 5 exécutions pour chaque instance. Il est à noter que les algorithmes sont robustes et donnent des écart-types faibles :

Inst./Obj.	Rg.	v.r.prio.	v.r.n.prio.	purges
022 R_P_NP	1	2,00	3,00	12,00
	2	2,00	3,00	12,00
	3	2,00	3,00	12,00
023 P_R_NP	1	0,00	66,00	192,40
	2	0,00	77,20	193,00
	3	0,00	68,20	192,80
024 P_R_NP	1	0,00	6,00	337,00
	2	0,00	12,00	352,80
	3	Indisp.	Indisp.	Indisp.
025 P_NP_R	1	0,00	160,00	407,60
	2	0,00	160,00	602,20
	3	0,00	160,00	437,80
028_1 P_NP_R	1	36,00	370,00	94,00
	2	36,00	341,40	95,40
	3	36,00	360,00	92,40
028_2 P_NP_R	1	0,00	0,00	3,00
	2	0,00	0,00	3,00
	3	0,00	0,00	3,00
029 P_R_NP	1	0,00	42,60	110,40
	2	0,00	66,00	111,80
	3	0,00	3,00	112,00
034_VP P_R_NP	1	0,00	586,80	55,80
	2	0,00	643,60	58,00
	3	0,00	582,00	56,60
034_VU P_R_NP	1	8,00	37,00	87,00
	2	8,00	35,80	87,00
	3	8,00	36,40	87,00
035_1 R_P	1	10,00	0,00	5,00
	2	10,00	0,00	5,00
	3	10,00	0,00	5,00
035_2 R_P	1	56,00	0,00	6,00
	2	56,00	0,00	6,00
	3	56,00	0,00	6,00
039_1 P_R_NP	1	0,00	239,00	69,00
	2	0,00	479,60	69,00
	3	0,00	221,20	69,80
039_3 P_R_NP	1	0,00	30,20	231,00
	2	0,00	2162,60	231,00
	3	0,00	30,00	231,00
048_1 P_R_NP	1	0,00	1044,80	196,00
	2	0,00	1016,00	196,00
	3	0,00	1053,80	196,00
048_2 P_R_NP	1	31,00	1116,20	76,80
	2	31,00	1128,40	79,00
	3	31,00	1118,60	77,60

Indisp.=Indisponible.

064_1 P_R_NP	1	61,00	29,80	187,20
	2	61,00	81,40	190,80
	3	61,00	29,00	190,40
064_2 P_R_NP	1	0,00	0,00	37,00
	2	0,00	0,00	37,00
	3	0,00	0,00	37,00
655_1 P_R_NP	1	0,00	0,00	30,00
	2	0,00	0,00	30,00
	3	0,00	0,00	30,00
655_2 P_R_NP	1	153,00	0,00	34,00
	2	153,00	0,00	34,00
	3	153,00	0,00	34,20

Nous constatons que ces résultats sont extrêmement proches : tous égaux sur le 1er objectif, voire égaux sur les 3 objectifs pour certaines instances. D'ailleurs, la procédure d'évaluation de la phase de qualification du challenge consistant à calculer pour chaque équipe :

- pour chaque instance, calculer la note de l'instance par

$$10^6 * objectif1 + 10^3 * objectif2 + objectif3,$$

- pour chaque instance, normaliser la note quant à la meilleure et la pire des notes par

$$\frac{note_{\text{équipe}} - note_{\text{pire}}}{note_{\text{meilleure}} - note_{\text{pire}}}$$

- calculer la moyenne sur toutes les notes des instances,

n'a pas suffi de départager clairement les équipes en tête du classement. Nous avons observé un tassement des meilleures équipes à cause du biais introduit par les mauvaises notes des équipes en fin de classement.

Pour lever ce biais, l'évaluation de la phase finale a été modifiée en introduisant une procédure de « chaise musicale » autour du calcul des moyennes. A chaque tour d'évaluations et de classement, l'équipe en fin de classement est classée et retirée pour le tour suivant. La procédure est arrêtée lorsqu'un classement est faite sur les trois meilleures équipes restantes.

A noter que le plantage du programme de la 3ème équipe sur l'instance 024 a lourdement pénalisé cette équipe dans le classement final.

3.2.5 Importance de l'implémentation

Compte tenu de la contrainte de temps de calcul et la grande taille de certaines instances, les meilleures équipes ont apporté une grande attention aux choix d'implémentation, afin d'explorer un très grand nombre de voisinages. Ainsi l'équipe vainqueur (Estellon, Gardi et Nouioua), grâce aux voisinages tenant dans la mémoire cache du processeur et à une technique d'évaluation partielle des solutions, réalisait

en moyenne 170 millions évaluations de voisinage dans les dix minutes de calcul. L'équipe arrivée en second (Aloise, Noronha, Rocha, Ribeiro et Urrutia) a défini des structures de données lui permettant d'évaluer les mouvements de véhicules en $O(m)$, m étant le nombre de contraintes de ratio.

4 Conclusions

Même si le problème du Car Sequencing est déjà bien connu dans la littérature, ce challenge ROADEF fut riche d'enseignements quant aux méthodes utilisées par les équipes. Il est à noter que si cette problématique a été un « benchmark » historique des techniques de PPC [2], un seul candidat y a eu recours de manière marginale.

Les attentes de RENAULT ont été largement dépassées : l'intégration de l'algorithme vainqueur du challenge dans les systèmes informatiques opérationnels est sérieusement à l'étude, compte tenu des gains économiques conséquents. Des groupes de travail avec les usines pilotes ont débuté pour préparer le déploiement du nouvel algorithme. En effet, le potentiel de cette nouvelle méthode de résolution ouvre de nouveaux arbitrages entre les contraintes peinture et montage : par exemple, ne pourrait-on pas relâcher certaines contraintes au montage pour générer des gains encore plus conséquents en peinture ?

Un certain nombre d'extensions au problème soumis au challenge vont être étudiées. Ces extensions n'ont pas été présentées au challenge pour des raisons de simplicité. Il s'agit de :

- Gérer des plages de positionnement imposées pour certains véhicules, qui doivent par exemple passer en chaîne à des créneaux horaires précis pour des contrôles qualité. Ce sont des contraintes dures.
- Traiter les contraintes de ratio « croisées » : ces ratios concernent deux caractéristiques techniques (A) et (B). « A B 1/N » signifie que tout véhicule de caractéristique B doit être distant d'au moins N-1 positions de tout véhicule de caractéristique A et vice-versa. Ces contraintes de ratio croisées ont pour but de générer des rafales dans le film (!).
- Construire « plusieurs films véhicules en un seul » : dans certaines usines, le film véhicules passe sur 2-3 chaînes peinture avant de fusionner sur une unique chaîne de montage. Il faut donc construire des rafales couleur par chaîne peinture avec des véhicules qui sont soit spécialisés sur une des chaînes de peinture, soit fabricables sur plusieurs lignes de peinture.
- Assister les opérationnels sur les contraintes de ratio à relâcher pour améliorer de manière consé-

quente les rafales de couleur.

Enfin, ce challenge ROADEF'2005, le 4ème du nom, confirme et renforce la portée internationale de cette compétition. Nous avons reçu 55 déclarations de participation venant de 15 pays pour 27 programmes rendus à la fin de la phase de qualification. Les sélections ont abouti à 12 équipes de 7 pays (Allemagne, Bosnie-Herzégovine, Brésil, Canada, France, Pays Bas, Pologne) invitées pour une présentation au congrès ROADEF'2005 à Tours.

Par ailleurs, la qualité des dossiers rendus, en particulier chez les équipes Juniors, a atteint un niveau exceptionnel. Pour la première fois, ce sont deux équipes juniors qui ont fini 1er et 2ème au classement général. Nous pouvons donc nous réjouir, la relève est bien assurée !

Ce challenge a donc encore une fois atteint le double objectif de promouvoir les approches et les techniques de résolution des problèmes (NP-)difficiles auprès des partenaires industriels, et de permettre aux chercheurs de travailler sur des problèmes avec des exigences industrielles. Tous les détails des challenges ROADEF peuvent être trouvés à partir du site WEB www.roadef.org.

Remerciements

Nous adressons nos plus vifs remerciements, d'une part aux organisateurs et au comité de programme pour leur invitation à présenter le challenge ROADEF'2005 aux journées JFPC'2005, et d'autre part aux équipes candidates d'avoir animé le challenge par leur participation et aux sociétés RENAULT, EURO-DÉCISION et ROADEF pour leur parrainage.

Références

- [1] T.-L. Chew, J.-M. David, A. Nguyen, and Y. Tourbier. Solving constraint satisfaction problems with simulated annealing : The car sequencing problem revisited. In *12th Int'l Workshop on Expert Systems and their Applications*, pages 405–416, Avignon, France, 1992.
- [2] M. Dinçbas, H. Simonis, and P. van Hentenryck. Solving the car sequencing problem in constraint logic programming. In *ECAI-88*, pages 290–295, 1988.
- [3] J. Gottlieb, M. Puchta, and C. Solnon. A study of greedy, local search and ant colony optimization approaches for car sequencing problems. In *Applications of Evolutionary Computing (EvoCOP 2003)*, volume 2611 of *LNCS*, pages 246–257. Springer, 2003.

- [4] M. Gravel, C. Gagné, and W.L. Price. Review and comparison of three methods for the solution of the car sequencing problem. *Journal of the Operational Research Society*, 2004.
- [5] M. Puchta and J. Gottlieb. Solving car sequencing problems by local optimization. In *Applications of Evolutionary Computing*, volume 2279 of *LNCS*, pages 132–142. Springer, 2002.
- [6] J.-C. Régim and J.-F. Puget. A filtering algorithm for global sequencing constraints. In *Principles and practice of constraint programming*, volume 1330 of *LNCS*, pages 32–46. Springer, 1997.
- [7] C. Solnon. Solving permutation constraint satisfaction problems with artificial ants. In *ECAI-2000*, pages 118–122. IOS Press, 2000.
- [8] T. Warwick and E. Tsang. Tackling car sequencing problems using a genetic algorithm. *Evolutionary Computation*, 3(3) :267–298, 1995.