Titre: Title:	Planification des tournées du Cirque du soleil
Auteur: Author:	Ahmed Beljadid
Date:	2006
Type:	Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis
Référence: Citation:	Beljadid, A. (2006). Planification des tournées du Cirque du soleil [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. https://publications.polymtl.ca/7700/

URL de PolyPublie: PolyPublie URL:	https://publications.polymtl.ca/7700/
Directeurs de recherche: Advisors:	Alain Hertz, & François Soumis
Programme: Program:	Non spécifié

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

PLANIFICATION DES TOURNÉES DU CIRQUE DU SOLEIL

AHMED BELJADID
DÉPARTEMENT DE MATHÉMATIQUES ET DE GÉNIE INDUSTRIEL
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(MATHÉMATIQUES APPLIQUÉES)
MARS 2006

Your file Votre référence
ISBN: 978-0-494-17931-4
Our file Notre référence
ISBN: 978-0-494-17931-4

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

PLANIFICATION DES TOURNÉES DU CIRQUE DU SOLEIL

présenté par : BELJADID Ahmed
en vue de l'obtention du diplôme de : maîtrise ès sciences appliquées
a été dûment acceptée par le jury d'examen constitué de :

M. LANGEVIN André, Ph.D., président
M. HERTZ Alain, Doct.ès.Sc., membre et directeur de recherche
M. SOUMIS François, Ph.D., membre et codirecteur de recherche
M. CORDEAU Jean-François , Ph.D., membre

À mes parents...

À ma famille...

À Ahmed...

REMERCIEMENTS

Je remercie M. Alain Hertz, mon directeur de recherche, pour son énorme soutien, son assistance, ses conseils et pour sa disponibilité tout au long de mon projet de maîtrise. Je le remercie, en plus, pour le cadre du travail qu'il m'a offert. Je remercie également M. François Soumis, mon codirecteur de recherche, pour son grand intérêt et son grand soutien. Je remercie mes deux directeurs pour leurs soutiens financiers tout au long de ma maîtrise.

Je tiens à remercier Mme Ines Lenzi et M. André Côté, du Cirque du Soleil, pour leur collaboration et pour leur gentillesse.

Mes remerciements à Ismaïl, particulièrement, à mes amis et à toute la famille du GERAD.

Je remercie enfin ma femme et mes enfants pour ...

RÉSUMÉ

Le Cirque du Soleil effectue des présentations dans différentes villes. Pour ce faire, l'établissement entame des tournées prolongées qui consistent en des visites séquentielles des points où le cirque va offrir des spectacles. Cependant, si une tournée n'est pas bien planifiée en termes d'itinéraires des spectacles, de durée des présentations et de dates des représentations, le profit risque d'être moindre. C'est pourquoi, il est important de se doter d'outils permettant de se décider sur les différents paramètres qui influencent le profit et ainsi, pouvoir maximiser les gains. C'est dans ce cadre que s'inscrivent les travaux effectués dans ce mémoire.

L'objectif est de concevoir un système d'aide à la décision. Ce système va permettre le choix adéquat des villes à visiter, des dates et des durées des présentations ainsi que les itinéraires des spectacles, l'objectif étant de maximiser le profit. À cet effet, nous avons utilisé la Recherche Tabou, qui constitue le noyau du système, et qui permet de résoudre les différents problèmes mathématiques associés au problème. Nous avons doté le système d'une interface graphique très conviviale et, pour stocker l'historique et en faciliter l'exploitation, nous avons développé un système propriétaire de gestion de base de données. Enfin, nous avons mis à la disposition de l'utilisateur, un ensemble de rapports (états de sortie) qui présentent et formatent les résultats selon ses besoins.

ABSTRACT

The "Cirque du Soleil" carries out shows in different cities all over the world. The tours consist of sequential visits at locations where the circus will offer spectacles for a given period of time. However, if a tour is not well planned in terms of duration, dates and itinerary, the profit will consequently be affected. For this purpose, it is very interesting to have tools allowing the user to decide on the various parameters which influence the profit and thus maximize it. In this thesis, we aim to conceive a decision support system for this planning problem. The targeted system will allow an adequate choice of locations (itinerary), dates of visits and shows' durations. We use the Tabu Search metaheuristic, which constitutes the core of the system for the various mathematical problems we have to solve. Also, we have designed a very user-friendly graphical interface. Moreover, we have conceived a proprietary Data Base Management System (DBMS) to store data history and facilitate its management and use. As outputs, we provide a set of reports that aim to format the results to the user to meet his needs.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

LISTE DES ALGORITHMES

LISTE DES ANNEXES

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

Au début des années 1980, des amuseurs publics, jeunes, rêveurs et entrepreneurs autodidactes ont eu l'idée et le goût de créer le Cirque du Soleil. Bien avant le jour où ils allaient stimuler l'imaginaire des spectateurs partout dans le monde, les premiers artisans du Cirque du Soleil présentaient leur spectacle dans la rue. Aujourd'hui,[1] le Cirque du Soleil compte sept spectacles en tournées, cinq spectacles fixes, des séries télévisées, des documentaires et des films.

Dans cette étude on s'intéresse, uniquement, aux spectacles en tournées. Une tournée consiste à donner des représentations dans des villes choisies dans un ensemble préalablement déterminé. Chaque représentation (show) est caractérisée par le nom du spectacle, le nom de la ville et la date de la représentation (l'heure est prise en considération dans le paramètre date car deux représentations peuvent avoir lieu le même jour). L'ensemble des représentations d'un même spectacle dans une même ville, durant une période, est appelé *présentation*. Chaque présentation est un couple composé du nom du spectacle et du nom de la ville. Programmer une tournée pour un spectacle revient à choisir les villes à visiter, à déterminer le séquencement des villes (itinéraire) et à fixer les dates et les durées des présentations.

Dans ce chapitre, on décrit en détails le projet dénommé "Planification des tournées du Cirque du Soleil". Dans la première section, on s'intéresse à la motivation générale du projet et aux objectifs attendus de ce travail. Dans la deuxième section, on détaille les éléments principaux influençant le profit. Puis, dans la troisième section, on expose les principales contraintes. Dans la quatrième section, on présente l'approche choisie pour mener à bien ce projet. Et enfin, l'organisation de ce rapport fait l'objet de la dernière section.

[1]date du 31 décembre 2005

1.1 Motivation générale et objectifs

Afin de programmer / planifier une nouvelle tournée, suite à la création d'un nouveau spectacle, ou afin de modifier les tournées déjà programmées, le Cirque du Soleil se base sur la planification des tournées antérieures. L'ensemble des données relatives à chaque tournée est énorme. Le choix des villes, des durées des présentations et de l'itinéraire des tournées se fait actuellement grâce à la grande expérience de l'équipe responsable de la planification au Cirque du Soleil. Toutefois, ces planificateurs ont ressenti le besoin de vérifier les solutions proposées à l'aide d'outils mathématiques. Pour ce faire, on a tout d'abord effectué une analyse préliminaire. Cette analyse avait pour objectif de vérifier si des pistes d'optimisation prometteuses (améliorations des solutions planifiées) étaient possibles. L'existence de telles pistes a permis le début d'une collaboration entre le Cirque du Soleil et le GERAD. C'est dans ce cadre que le projet "Planification des tournées du Cirque du Soleil" a vu le jour.

Le projet consiste à mettre en oeuvre un système d'aide à la décision permettant de bien choisir les villes à visiter, lors des tournées du Cirque du Soleil, et de déterminer la durée et la date de chaque présentation. L'objectif est de permettre au Cirque du Soleil d'optimiser chacune de ses tournées afin de maximiser les profits.

L'optimisation des tournées est l'objectif du projet. Toutefois, l'implantation d'un système de gestion de base de données pour faciliter l'exploitation de l'historique et pour permettre des vues spécifiques (reports) fait partie du cahier des charges. Ainsi, les ajouts des tournées, les modifications des données et les simulations des scénarios comptent parmi les objectifs du projet.

L'objectif est de mettre à la disposition du Cirque du Soleil un système d'aide à la décision pour planifier ses tournées. Ce système vise à fournir aux responsables un outil de consultation commode, d'une ergonomie aisée, de façon à minimiser les tâches de recherche de l'information. Ainsi, l'ensemble des choix stratégiques du Cirque du Soleil doit être respecté tout en maximisant les profits. Ce système est un outil d'observation et de description qui vise, à partir de données et de statistiques collectées lors des tournées déjà effectuées, à donner aux gestionnaires les moyens de disposer d'outils de planification.

Un système d'aide à la décision tire parti de l'ensemble des données produites ou acquises par l'entreprise, ensemble dont il fournit une présentation synthétique. Le système vise à présenter des informations utiles. Ceci implique qu'il soit construit selon des critères de sélectivité en choisissant, parmi toutes les statistiques qu'il est possible de produire, celles qui peuvent servir. Sa construction suppose une analyse des besoins, elle-même fondée sur les missions à remplir et les besoins correspondants.

Le projet est composé de trois étapes séquentielles. La première étape, dite analyse préliminaire, a pour objectif de tester si un potentiel d'optimisation est présent. Cette étape représente une analyse des données. Elle se base sur l'ensemble des données collectées au cours des tournées déjà effectuées (historique).

Grâce aux résultats fournis par cette analyse préliminaire décrite au Chapitre 4, la collaboration entre le Cirque du Soleil et le GERAD a vu le jour. Le projet né, qui sera nommé "Phase I" par la suite, consistait à développer un logiciel prototype pour l'optimisation des tournées du Cirque du Soleil. L'optimisation combine les trois facteurs d'économie suivants :

- La durée optimale des spectacles dans les villes.
- Le séquencement des villes qui minimise la distance totale parcourue (itinéraire).
- L'espacement régulier des spectacles dans les villes (en général un spectacle tous les deux ans).

Dans la "Phase I", une première étape a consisté à générer un profil de vente de billets pour chaque ville, sur la base de l'historique des ventes. Ces profils permettent de prédire les ventes pour les spectacles qui doivent être planifiés. La deuxième étape a été le développement d'un outil ayant pour tâche d'optimiser une planification donnée sans trop modifier la planification initiale (modification de la durée de chaque spectacle dans chaque ville d'au plus une semaine ; modification de la date de la présentation d'au plus trois mois...), en se basant uniquement sur les revenus de la billetterie.

Une fois que la "Phase I" a été menée à bien, un nouveau projet a vu le jour. Ce nouveau projet, nommé "Phase II", en est une continuité. Il offre plus de liberté pour la modification de la tournée initiale pour les trois facteurs de la "Phase I" ; en plus, il permet l'introduction d'un quatrième facteur d'optimisation. Ce quatrième paramètre est le nombre de villes présentes dans une tournée. Ainsi, on peut réduire le nombre de villes dans une tournée pour maximiser les profits. L'ajout de nouvelles villes dans une tournée ainsi que le remplacement de villes faisant partie d'une tournée par de nouvelles villes ne figuraient pas dans le cahier des charges. En outre, cette "Phase II" avait pour objectif d'introduire les coûts liés aux tournées, de rendre l'espacement entre spectacles spécifique à chaque ville (au lieu de deux ans, chaque ville a son propre espacement idéal) et enfin de créer une interface conviviale pour la mise à jour des données, incluant principalement un SGBD (Système de Gestion de Base de Données) avec des éditions d'états (reports). L'objectif de cette étape était de fournir un système d'aide à la décision permettant de simuler des tournées afin de choisir la meilleure planification possible. En plus de l'interface conviviale et du SGBD (Système de Gestion des Bases de Données), cette phase avait pour objectif d'autoriser de plus importantes modifications à une planification proposée, par rapport à ce qui avait été fait à la "Phase I".

Tout en tentant de maximiser le profit, les méthodes d'optimisation que nous avons mises en place devaient tenir compte des contraintes fortes imposées par le Cirque du Soleil. Ces contraintes sont décrites en détail dans le Chapitre 3. De plus, l'optimisation devait porter sur une période déterminée (entre une date début et une date fin). Les présentations avant cette période sont considérées comme un historique qui est nécessaire pour déterminer la ville de départ de chaque tournée, et les présentations après cette période ne sont pas considérées.

1.2 Éléments principaux influençant le profit

Nous débutons cette section par un survol des éléments principaux influençant le profit. Puis, nous décrirons les paramètres, aussi appelés pistes d'optimisation, qui permettent d'améliorer le profit.

Une tournée, ou un spectacle en tournée, est une séquence de présentations. À chaque présentation, on associe un profit. Ce profit dépend, essentiellement, des gains générés par la vente des billets et des coûts liés aux charges associées à cette présentation. Différents types de charges participent au calcul des profits :

- Des charges fixes liées à la construction des chapiteaux, au logement et à la maintenance du site.
- Des charges variables, dites temporaires, telles la cuisine, le massage et les costumes. Ces charges dépendent de la durée de la présentation et du nombre de représentations (shows).
- Des charges de transports qui sont variables et qui sont liées à l'itinéraire des tournées.

Le profit de chaque présentation dépend essentiellement de la ville où le spectacle est présenté, car chaque ville a des caractéristiques qui lui sont propres. D'une part, l'audience varie d'une ville à l'autre (population, coutumes,...), par conséquent les ventes de billets sont étroitement liées à la ville plus qu'à la nature du spectacle lui-même. D'autre part, les charges diffèrent d'une ville à une autre : les coûts de construction du chapiteau, la location du site pour les charges fixes et les taux horaires pour les charges temporaires sont propres à chaque ville.

On voit que le choix des villes à visiter est un élément clé. Un ensemble de villes potentielles (suite à des études effectuées par le Cirque du Soleil) a ainsi été déterminé. L'exploration d'autres marchés est cependant toujours possible.

Lorsqu'une ville fait partie d'une tournée du Cirque du Soleil pour la première fois, la planification de cette ville se limite essentiellement à déterminer la durée de la présentation. Par contre, les villes dans lesquelles un spectacle a déjà été en tournée nécessitent le choix de dates adéquates. En effet, la présence d'un spectacle dans une ville exige qu'un temps minimal entre deux spectacles successifs soit respecté avant qu'un autre spectacle puisse être présenté dans cette ville. On parle d'espacement minimal entre deux spectacles successifs.

Grâce à l'étude préliminaire (chapitre 4), trois facteurs importants, influençant le profit, ont été fixés. Le premier paramètre est la *durée* de chaque présentation. Ce paramètre est calculé en nombre de semaines. Ainsi si une programmation initiale consiste à rester K semaines dans une ville pour un spectacle donné, le fait d'ajouter ou d'enlever des semaines influence énormément le profit. En effet, la variation de la durée fait varier la vente des billets. Des courbes de revenu ont été réalisées (figure 5.1). La variation de la durée fait changer également les coûts des charges temporaires et par conséquent le profit.

Le deuxième paramètre est la *distance.* Ce paramètre est lié aux charges de transport. Suite à l'itinéraire de chaque tournée, les charges du transport sont calculées de ville en ville. Afin de maximiser le profit, on réduit ces coûts. En plus du profit généré grâce à la réduction des charges de transport, un profit plus important lié au temps gagné peut être généré en ajoutant des semaines à des présentations.

Le troisième paramètre, dit *espacement*, est le temps entre deux spectacles successifs présentés dans une même ville. Ces spectacles successifs, qui peuvent être identiques, participent à déterminer l'audience potentielle. En effet, un espacement trop court a tendance à réduire le profit parce que le public a déjà assisté à un spectacle il y a peu de temps. Quant à un espacement trop long, les frais de publicité et de marketing deviennent élevés pour fidéliser le public. Ainsi, on associe à chaque ville un espacement idéal qui permet d'un part de réduire les coûts de publicité et de marketing et d'autre part de fidéliser le maximum du public.

Un des objectifs de la "Phase I" était de permettre l'optimisation des trois premiers paramètres décrits ci-dessus indépendamment (un par un), le but étant d'offrir un maximum de liberté aux responsables du Cirque du Soleil dans leurs choix de planification. Toutefois, la possibilité de combiner ces paramètres entre eux doit être offerte par le système d'aide à la décision à réaliser.

Un quatrième paramètre, qui est le *nombre de villes* dans chaque tournée, a été pris en considération lors de la "Phase II". Ainsi si une planification consiste à visiter N ville pour un spectacle donné, et ce entre une date début et une date fin, le fait d'ajouter ou d'enlever des villes influence énormément le profit. En effet ajouter une ville exige qu'on enlève des semaines de représentations dans d'autres villes afin de créer un espace temps permettant de programmer le spectacle dans la nouvelle ville ajoutée. Enlever une ville permet de libérer des semaines qui peuvent être ajoutées à d'autres présentations.

Plusieurs autres éléments influencent le profit, par exemple on cite le succès d'un spectacle précédent dans une ville ou dans une ville proche, la publicité, le marketing, etc...Toutefois ces éléments sont en majeur partie qualitatifs. Ces éléments dépassent le cadre de ce projet.

Un autre paramètre qui n'est pas vraiment pris en compte dans ce projet, est le nombre de représentations par semaine de chaque spectacle. Ce nombre est liée aux caractéristiques de chaque ville. Les villes sont regroupées en classes, et le Cirque du Soleil a déterminé pour chaque classe, un nombre de représentation par semaine, en fonction du nombre de semaine (voir Courbes de revenu au chapitre 5). L'optimisation de ce paramètre n'est pas pris en considération pour deux raisons. La première raison est que le revenu dépend principalement de la durée de la présentation, et que le nombre de représentations est fonction de cette durée (selon une séquence préétablie). Ainsi, son influence sur le profit vient en second plan. Toutefois, le modèle que nous avons développé prend explicitement en compte le nombre de représentations par semaine, et il est possible ainsi de modifier certains de ces nombres pour en étudier leur influence sur le profit. La deuxième raison pour la non prise en compte de ce paramètre est que le Cirque du Soleil a tendance à ne conserver dans l'historique que les revenus hebdomadaires, sans donner de détails sur le nombre de représentations ayant eu lieu chaque semaine.

1.3 Principales contraintes

La planification d'une tournée du Cirque du Soleil se base sur l'ensemble des caractéristiques des villes à visiter (villes potentielles de ce spectacle) et sur les données déduites des autres spectacles en tournée. Plusieurs contraintes sont à respecter. Ces contraintes concernent essentiellement les dates et les durées des présentations. Chaque ville possède des fenêtre de temps où les visites des spectacles sont permises. En effet, pour les périodes où les conditions météorologiques sont défavorables, et pour les périodes où de grands événements sont prévus, la programmation d'un spectacle pourrait tourner au désastre. Ainsi, on doit respecter les fenêtres de temps de chaque ville. Une autre contrainte, très importante, consiste à respecter l'espacement minimal requis entre deux spectacles dans une même ville. À titre d'exemple, on ne peut pas programmer deux spectacles dans une même ville à des dates identiques ni d'ailleurs dans un intervalle de temps de moins d'une année. Alors, pour programmer un spectacle, on doit s'intéresser à la fois à l'historique des tournées et à la planification future des présentations. Une troisième contrainte, aussi importante que la deuxième, liée à la durée des présentations et non à la date, exige qu'on respecte une durée minimale pour chaque présentation. Cette durée minimale est nécessaire pour que la présence dans une ville soit profitable. Se déplacer, s'installer et investir pour faire une présentation d'une semaine n'a guère de sens. L'équipe de planification des tournées a estimé qu'une présentation permet de rentabiliser les investissements (déplacement, location site, construction,...) à partir de la quatrième semaine; ainsi une durée minimale de quatre semaines est exigée pour chaque présentation et toute programmation de moins de quatre semaines est considérée invalide.

Un spectacle peut être programmé plus d'une fois dans la même ville, à condition bien sûr de respecter les contraintes d'espacement. De plus, il n'est pas indispensable de visiter chaque ville dans chaque tournée. On peut en fait choisir pour chaque tournée un sous ensemble de villes dans les villes potentielles. Ce nombre de ville doit être supérieur ou égal à un nombre minimal fixé de villes pour chaque tournée.

D'autres contraintes supplémentaires portent sur la période de la simulation, sur les limites des changements qu'il est possible d'apporter à une planification donnée. Plus de détails seront donnés au Chapitre 3.

1.4 Approche choisie

Il est difficile voir impossible de donner une modélisation complète du processus de décision lors de la planification des tournées du Cirque du Soleil. La décomposition du problème en sous-problèmes permet au moins de modéliser une partie de ce processus. Nous avons opté pour un Système Interactif d'Aide à la Décision se basant sur les modèles descriptifs, explicitement la simulation et la prédiction. Notre choix est lié à la nature du projet. Il a pour objet de décrire et/ou de prédire les caractéristiques des planifications simulées sous différentes configurations.

Durant la recherche d'information (l'étude préliminaire), on s'est basé sur l'historique des données pour déterminer des pistes d'optimisation prometteuses. Ainsi, après la collecte de données (Voir Chapitre 4), nous avons pu générer des courbes comparatives et des propositions de nouvelles tournées qui ont été jugées prometteuses.

Une fois l'étude préliminaire achevée, le problème à traiter (objectif principal de la "Phase I"), était de permettre l'optimisation des trois paramètres suivants :

1. *Durée* : la durée de chacune des présentations.
2. *Distance* : l'itinéraire de chaque spectacle (tournée).
3. *Espacement* : l'espacement entre deux spectacles successifs dans une même ville.

Il n'est pas possible de réduire ces trois paramètres à un critère unique afin d'obtenir un programme mathématique mono-objectif. En effet, ces paramètres guide l'optimisation dans des régions différentes de l'espace des solutions. Ainsi, par exemple, une tournée optimale au sens de kilomètres parcourus ne l'est probablement pas pour ce qui est de l'espacement des spectacles consécutifs dans une même ville.

L'approche adoptée consiste à construire autant d'objectifs que de critères d'évaluation. L'inconvénient de cette modélisation est qu'il est généralement impossible d'optimiser simultanément tous les objectifs, par conséquent il n'y a pas de solution unique. Cependant, la force de cette approche réside dans le développement de la coopération entre le décideur et les modèles mathématiques.

Pour ce faire, les paramètres sont traités indépendamment l'un après l'autre. Ceci permet d'une part de ne pas trop modifier une solution initiale proposée par le planificateur, et d'autre part de donner plus de liberté aux responsables du Cirque du Soleil dans leurs choix de planification. Ainsi, des combinaisons séquentielles d'optimisation sont toujours possibles. On applique une optimisation selon un critère et si on juge que la solution proposée est intéressante on peut toujours lui appliquer une optimisation selon un autre critère en limitant les modifications du premier critère.

Contrairement à la *Durée* et à la *Distance* dont on peut mesurer l'impact sur le profit, la mesure du paramètre *Espacement* est de nature qualitative. L'intégration de cette mesure dans une fonction objective pour une optimisation globale des trois paramètres n'a donc pas vraiment de sens. Nous avons opté pour une mesure de l'espacement qui pénalise les situations où des spectacles consécutifs dans une même ville n'ont pas l'espacement idéal pour cette ville. La pénalité est proportionnelle à l'écart par rapport à la valeur idéale.

Pour résoudre ces trois problèmes d'optimisation, notre choix s'est porté sur la méthode Tabou qui est une métaheuristique capable de produire des solutions de bonne qualité en des temps très raisonnables. La détermination rapide de bonnes solutions permet de valider les résultats de l'étude préliminaire et ainsi justifier les pistes prometteuses d'optimisation. Outre le paramètre temps, la facilité d'intégrer les modules de la méthode Recherche Tabou dans un système d'aide à la décision (prototypage en génie logiciel) en cas d'une continuité éventuelle du projet est un élément clé dans le choix de cette métaheuristique. Un autre élément aussi important que le paramètre temps est le coût de la méthode de résolution. En effet, l'acquisition des logiciels tels que GENCOL et CPLEX peut être coûteux, alors que l'implantation de la méthode Tabou ne nécessite qu'un compilateur.

La "Phase II" qui représente une continuité du projet a permis la prise en compte d'un quatrième paramètre. Sans modifier l'approche choisie, ce paramètre a pu être traité indépendamment des trois autres paramètres. Deux variantes ont été testées , une variante interactive permettant la validation de chaque changement effectué à la solution initiale (pour ne pas avoir une solution trop différente de la solution initiale), et une autre variante qui donne la solution finale sans les étapes intermédiaires.

Notre Système Interactif d'Aide à la Décision, est basée sur la comparaison des alternatives. L'Interface Homme/Machine permet d'introduire des planifications initiales comme entrées. Les modèles (noyau) sont des outils de recherche opérationnelle se basant sur la Recherche Tabou permettant de générer des alternatives (des améliorations de planification selon les critères du planificateur). Les données sont stockées et gérées par le SGBD. Comme sortie, un ensemble d'états (reports) est établi.

1.5 Organisation du document

Ce rapport de thèse se compose de six chapitres. Dans ce premier chapitre, on a décrit dans sa première section le contexte générale du projet et les objectifs à atteindre.

Dans sa deuxième section, on a recensé les éléments principaux influençant le profit. Dans sa troisième section on a décrit brièvement les principales contraintes traduisant l'ensemble des choix stratégiques du Cirque du Soleil. Et enfin dans son avant dernière section on a décrit l'approche choisie pour la réalisation de ce projet.

La suite de ce document est organisée de la façon suivante. Dans le deuxième chapitre, on présente le cadre théorique du problème. Ce chapitre sera consacré à une revue de la littérature. On traitera en premier lieu, de la théorie des systèmes interactifs d'aide à la décision. En second lieu, nous décrirons un ensemble de problèmes d'optimisation étroitement liés au problème de la planification des tournées du Cirque du Soleil, ainsi que les méthodes de résolution existantes pour ces problèmes.

Le troisième chapitre définit les problèmes à optimiser d'une manière mathématique, formelle. Dans ce chapitre on détaille l'ensemble des contraintes exigées par les choix stratégiques ainsi que l'ensemble des contraintes liées à la modélisation du système d'aide à la décision. De plus, les quatres problèmes d'optimisation à résoudre seront décrits en détails.

Le quatrième chapitre traite de l'analyse des tournées actuelles, ce qui a permis la mise en évidence du potentiel d'optimisation. Une analyse des données est décrite dans la première section et les paramètres d'optimisation en seconde section.

Le cinquième chapitre se penche sur la collecte des données et la préparation de ces données pour l'exploitation. On s'intéresse aux revenus, aux charges, à la distance inter-villes et aux fenêtres de temps.

Le sixième chapitre décrit les métaheuristiques en détaillant profondément la méthode Tabou. En plus, la résolution des quatres problèmes formalisés au chapitre trois fait l'objet de ce chapitre. Chaque problème est traité à part avec une description de son mode de résolution.

Dans le septième chapitre, une description des travaux réalisés ainsi que les résultats obtenus sont donnés. On s'intéresse dans ce chapitre à l'apport de l'outil réalisé.

Et enfin, en conclusion, on présente les extensions possibles pour une continuité possible de ce projet ainsi que les limitations actuelles, tout en résumant ce qui a été déjà réalisé à ce jour.

Nous donnons finalement en annexe la "Fable des randonneurs" qui illustre le fonctionnement de la méthode Tabou.

CHAPITRE 2 : REVUE DE LA LITTÉRATURE

Dans ce chapitre, on présente une revue de la littérature dans laquelle on décrit les systèmes d'aide à la décision et les problèmes d'optimisation liés au problème de planification des tournées du Cirque du Soleil.

2.1 Systèmes interactifs d'aide à la décision

Dans la vie quotidienne, les décisions sont souvent prises sur la base d'intuitions et d'expériences passées. Ce type de stratégies ne peut s'appliquer qu'à des problèmes familiers. Face à des nouvelles situations, la prise de décision devient difficile. De nos jours, l'environnement des décideurs évolue rapidement et devient de plus en plus complexe. Cette complexité est due, entre autre, à la quantité des informations accessibles, au nombre d'alternatives (décisions potentielles) et au coût des erreurs de décision.

Étant donné qu'il est difficile d'adopter une stratégie d'essais-erreurs, pour opter pour une décision, l'utilisation des systèmes interactifs d'aide à la décision, notés SIAD, s'avère nécessaire.

2.1.1 Définitions

Un SIAD [Turban, 1993], ou DSS pour "Decision Support System", est un système d'information interactif, flexible, adaptable et spécifiquement développé pour aider à la résolution d'un problème de décision en améliorant la prise de décision. Il utilise des données, fournit un interface utilisateur simple et autorise l'utilisateur à développer ces propres idées ou points de vue.

Une décision est un processus mental de choix devant plusieurs possibilités mutuellement exclusives. Sans alternative, il n'y a pas de décision. À chaque alternative est associée un résultat ou un bénéfice espéré qui peut guider le choix entre les alternatives. On distingue les "décisions bien structurées" (programmed decisions) et les "décisions peu structurées" (non-programmed decisions).

Une décision est bien structurée quand un processus connu existe permettant de traiter les informations. Elle correspond à un programme fixe. Par exemple, l'allocation de ressources (argent, temps, l'affectation d'employés ou d'équipement à des travaux...). L'objectif est de minimiser ou maximiser un objectif mesurable. Les techniques d'optimisation sont utilisées. La solution est la meilleure alternative trouvée par ces techniques d'optimisation.

Une décision peu ou mal structurée nécessite un gros effort pour être formalisée. La stratégie du décideur donne lieu à des procédures non programmées (d'un point de vue informatique) ou peu programmées. Résoudre le problème nécessite de faire appel à l'intuition et au savoir faire du décideur.

Les Systèmes Interactifs d'Aide à la Décision, SIAD, ont été conçus pour résoudre les problèmes peu ou mal structurés. Ces problèmes possèdent les ou l'une des caractéristiques suivantes :

- Il est impossible de trouver une modélisation complète du processus de décision. La décomposition du problème en sous-problèmes permet au moins de modéliser une partie du processus.
- Les préférences, jugements, intuitions et l'expérience du décideur sont essentiels.

2.1.2 Composantes d'un SIAD

Un SIAD se compose de trois modules : d'une Interface Homme/Machine, d'une base d'informations et d'une base de modèles (contenant les procédures de calcul).

L'interface Homme Machine, IHM, est interconnectée avec les deux autres modules. Elle constitue l'interface entre l'utilisateur et le reste du système. L'IHM permet la communication entre l'utilisateur et les différents composants du système en offrant l'accès à la base d'information et à la base des modèles. L'IHM doit être érgonomique.

La base d'information se compose d'une ou plusieurs bases de données. Les bases de données fournissent des mécanismes d'interrogation, notamment par des requêtes de mise à jour des données, de génération de rapports...

La base de modèles se compose d'un ensemble de modèles et d'un système de gestion de ceux-ci (optionnel). Les différents modèles peuvent être des outils de recherche opérationnelle, des modèles de prédiction, des modèles de simulation, des modèles financiers, des modèles statistiques ...[Turban, 1993]. Le système de gestion de la base de modèles joue un rôle similaire à celui d'un système de gestion de base de données, mais pour des modèles.

2.1.3 Processus de décision

On distingue trois phases dans le processus de décision [Lévine et Pomerol, 1989] et [Turban, 1993] : la recherche d'information, la conception et le choix.

Recherche d'information

Il s'agit d'identifier les objectifs du décideur, c'est-à-dire de définir le problème à résoudre. Il est, alors, nécessaire de rechercher les informations pertinentes en fonction des questions que se pose le décideur. Au cas où le problème est complexe, le problème est décomposé en sous-problèmes plus simples à résoudre. Cette phase se termine par un énoncé du problème à traiter.

La conception

Cette phase comprend la génération, le développement, l'analyse des différentes actions possibles et le choix d'un ou plusieurs modèles de décision en fonction de la complexité du problème à traiter.

Pour chaque modèle choisi (cf. paragraphe sur les modèles), il faut déterminer les variables de décision, les variables incontrôlables, les variables résultats ainsi que les relations mathématiques entre ces variables.

Pour un modèle quantitatif, la conception est composée des étapes suivantes :

- Détermination des composants du modèle : les variables de décision, les variables incontrôlables et les variables résultats.
- Structure du modèle : il s'agit de déterminer l'équation qui régit les relations entre les composants du modèle.
- Critère d'évaluation : l'évaluation des alternatives et le choix final dépend des critères utilisés.

- Génération des alternatives : pour les modèles normatifs, les alternatives sont générées automatiquement, tandis qu'avec des modèles descriptifs, il est souvent nécessaire de le faire manuellement.
- Prédiction des résultats : il est parfois nécessaire de prédire les résultats futurs de chaque alternative afin d'en évaluer les conséquences et de les comparer.
- Mesure des résultats : cette dernière étape sert à comparer les alternatives.

Le choix

Pendant cette phase, le décideur choisit entre les différentes solutions. Cette phase inclut la recherche, l'évaluation et la recommandation d'une solution appropriée au modèle.

Une solution à un modèle est un ensemble spécifique de valeurs pour les variables de décision. Cette solution identifie l'alternative sélectionnée. Cette phase se décompose en deux étapes : celle de recherche et celle d'évaluation. La phase de recherche peut être de type analytique (optimisation), aveugle (recherche exhaustive ou partielle) ou heuristique.

Pour des modèles normatifs, une approche analytique ou une énumération complète et exhaustive des différentes alternatives est utilisée (la solution fournie est optimale). Par contre pour des modèles descriptifs, un nombre limité d'alternatives est utilisé. La solution fournie est satisfaisante. Une évaluation menant à une recommandation (solution) est nécessaire dans ce cas. Parmi les méthodes utilisées, on cite : l'analyse de sensibilité, la méthode "What-if", et la méthode "goal seeking" [Pomerol, 1995].

2.1.4 Les modèles

On peut diviser les modèles en deux grandes classes, les modèles normatifs et descriptifs. Les premiers fournissent la meilleure solution et explorent l'ensemble des solutions. Les seconds donnent une solution assez bonne ou satisfaisante, mais n'explorent qu'une partie des solutions.

Parmi les modèles normatifs, on a les trois catégories suivantes : énumération complète, optimisation via des algorithmes, optimisation via des formules analytiques. L'énumération complète cherche la meilleure solution parmi un ensemble relativement petit d'alternatives. Alors que l'optimisation via des algorithmes cherche la meilleure solution parmi un grand ensemble d'alternatives (peut être infini). L'optimisation via des formules analytiques trouve la meilleure solution en une seule étape en utilisant des formules mathématiques.

Parmi les modèles descriptifs, on a les trois catégories suivantes : simulation, prédiction et heuristique. La simulation trouve la meilleure solution parmi les alternatives évaluées durant la simulation. La simulation est une technique pour mener des expériences. Elle a pour objet de décrire et/ou de prédire les caractéristiques d'un système donné sous différentes configurations. Dès que ces caractéristiques sont connues, la meilleure solution parmi les alternatives évaluées est choisie.

La prédiction permet de prédire le futur, c'est-à-dire de prévoir les conséquences des différentes alternatives dans le futur pour mieux les évaluer et pour faire un choix.

Les heuristiques trouvent rapidement d'assez bonnes solutions au problème (qui peuvent mêmes être optimales). Elles sont utiles lorsqu'il est nécessaire d'arriver à une solution satisfaisante plus rapidement.

2.2 Problèmes d'optimisation liés au sujet

En effectuant des recherches bibliographiques, je n'ai pas trouvé de problème similaire au problème d'optimisation de la "Planification des tournées du Cirque du Soleil" dans la littérature ; toutefois, j'ai détecté un ensemble de problèmes assez proches traitant une partie du problème de ce sujet. Dans cette section, on fait le survol des problèmes les plus proches du sujet. On s'intéresse à définir les problèmes, leur résolution et les similitudes avec notre problème.

2.2.1 TSP sans profits

Nous allons, dans un premier temps, donner quelques définitions du TSP et de quelques unes de ses variantes.

Le problème du voyageur de commerce, TSP pour "Traveling Salesman Problem", consiste à déterminer le cycle le plus court passant exactement une fois par chacun des noeuds d'un graphe. L'interprétation la plus fréquente du TSP consiste à déterminer l'itinéraire de distance minimale d'un voyageur de commerce qui, partant d'une ville appelée dépôt, doit visiter n-1 autres villes une et une seule fois chacune et revenir à son point de départ. En notant d_{ij} la distance entre chaque paire de ville (i, j), on parle de TSP symétrique lorsque $d_{ij} = d_{ji}$; dans le cas contraire le TSP est dite asymétrique.

L'apparition du TSP remonte à 1932, mais ce n'est qu'en 1954 [Dantzig et al., 1954] qu'on en a entrepris l'étude de façon soutenue. Le TSP est un problème NP-complet [Karp, 1972].

Le nombre de solutions réalisables au TSP avec n villes est $\frac{(n-1)!}{2}$. Pour n petit, l'énumération des solutions est la meilleure manière pour déterminer la solution optimale. Différentes méthodes de résolution existent pour le TSP de grande taille, mais nous ne les décrivons pas dans ce rapport. Le lecteur davantage intéressé peut consulter le lien suivant http://www2.imm.dtu.dk/ jla/routebib.html?#tsp pour une bibliographie traitant le TSP.

TSPTW

Le TSPTW pour "Traveling Salesman Problem with Time Windows" est une variante du problème du voyageur de commerce avec contraintes de fenêtres de temps. Les visites ne sont permises que dans un intervalle de temps pour chaque ville.

Le m-TSPTW pour "multiple-Traveling Selesman Problem with Time Windows" est une généralisation du TSPTW où m voyageurs de commerce se partagent la visite des villes. Toutes les tournées commencent et se terminent au même dépôt.

En s'intéressant uniquement à l'étude des charges de transport, et en relaxant la contrainte d'espacement minimal exigé (la planification porte sur une période moindre que l'espacement minimum), notre problème correspondra à un TSPTW pour chaque spectacle si on exige de visiter toutes les villes une seule fois. Ainsi, partant d'une planification initiale réalisable sans visites multiples de villes (respectant toutes les contraintes et chaque ville est visitée une seule fois), l'optimisation du paramètre *distance*, uniquement, correspondra à la résolution d'un TSPTW pour chaque spectacle traité indépendamment des autres.

m-TSPR

Le TSPR pour "Traveling Selesman Problem with Ressource" est une extension de TSPTW. En effet, le temps n'est pas l'unique ressource, plusieurs ressources (ou une autre ressource autre que le temps) sont considérées dans le problème. Le m-TSPR pour "multiple-Traveling Selesman Problem with Ressource" est une généralisation du TSPR avec m véhicules. Le m-TSPR correspond à visiter un ensemble de clients (villes) au moyen d'une flotte de véhicules (spectacles). Les chemins parcourus par ces véhicules sont toutefois soumis à des restrictions sur des ressources comme la capacité des véhicules, la durée de chaque itinéraire ou la date de service de chaque client.

[Villeneuve, 1999] propose un revue de littérature se basant sur la décomposition de Dantzig-Wolfe et la génération de colonnes pour la résolution du m-TSPR.

Lorsque les coûts dépendent d'une ou des plusieurs ressources, on est devant un m-TSPR avec coût sur les ressources.

Cette fois-ci, si on s'intéresse uniquement à l'étude des charges de transport, mais en tenant compte de la contrainte d'espacement minimal exigé, notre problème correspondra à un TSPR avec coût sur les ressources pour chaque spectacle, si on exige de visiter toutes les villes une seule fois.

Je n'ai pas trouvé de problème dont l'objectif est fonction d'une ressource (la *durée* dans notre cas) soumise à des contraintes (temps limité et fenêtres de temps) où on désire maximiser les profits.

SDVRP

Comme extension du TSP, le problème "Vehicle Routing Problem, noté VRP" est un nom générique utilisé pour décrire la classe de problèmes où les routes, d'une flotte de véhicules qui doivent visiter des clients, doivent être déterminées. L'objectif du VRP est de desservir un ensemble de clients, avec des demandes préétablies, en commençant et en terminant dans un dépôt tout en minimisant le coût total.

Le VRP est introduit par Dantzig et Ramser en 1959 pour la première fois. Les heuristiques sont généralement les plus utilisées pour résoudre ce problème et la Recherche Tabou reste la méthode la plus performante [Cordeau et Laporte 2004].

La variante du VRPTW, désignant le VRP avec fenêtres de temps, permet de contrôler les fenêtres de temps ; l'extension avec plusieurs dépôt, noté MDVRP, permet des départs de plusieurs villes (plusieurs spectacles). Une autre variante, qui nous intéresse, est le SDVRP, acronyme de Split Delivery Vehicle Routing Problem.

Le SDVRP est une relaxation du VRP où on permet à un client d'être servi par plusieurs véhicules si on réduit le coût total. Cette relaxation est très importante lorsque la capacité des véhicules est grande [Nowak, 2005]. Cette variante nous intéresse puisqu'elle permet les passages multiples.

Toujours pour le paramètre *distance* (charges de transport), si on permet des visites multiples à des villes, notre problème correspondra à un SDVRP. En effet, partant d'une planification initiale réalisable, l'optimisation du paramètre *distance*, uniquement, correspondra à la résolution d'un SDVRP pour chaque spectacle traité indépendamment des autres..

Pour plus de détails sur le VRP et ses extensions, on peut visiter le lien : http://neo.lcc.uma.es/radi-aeb/WebVRP/index.html.

En analysant toujours le paramètre *distance*, à ma connaissance, il n'y a pas de problème similaire à notre problème si on permet les visites multiples et on exige un espacement minimal entre les visites.

Discounted-Reward TSP

Lorsqu'on associe un "discount" du profit au temps de la visite (dans notre cas l'espacement parfait), le problème est dit Discounted-Reward TSP [Blum, et al., 2003]. L'idée c'est que dépendamment du temps de la visite, le profit est re-calculé (profit initial moins une pénalité).

Traiter uniquement les paramètres *distance* et *espacement* nous amène à un multi-Discounted-Reward TSP.

2.2.2 TSP avec profits

Dans la première section TSP sans profits, le choix d'un sous ensemble de clients à visiter parmi un ensemble de clients potentiels est omis. En effet, on doit visiter tous les clients. Cette section s'attaque à la possibilité d'effectuer ce choix.

Orienteering Problem

On considère un ensemble de points (clients) ayant chacun un score (profit) qui lui est associé. On considère de plus un point de départ et un point d'arrivée. Le problème "orienteering problem (OP)" consiste à trouver un chemin entre le point de départ et le point d'arrivée qui maximise le score total dans un temps limité (une ressource limitée). À cause du temps limité, on ne peut visiter tous les points.

OP est équivalent au TSP quand les points de départ et d'arrivée ne sont pas fixés d'avance et le temps est suffisant pour couvrir tous les points. L'OP est aussi connu sous le nom du Voyageur de Commerce sélectif, noté Selectif TSP.

L'OP est parfois appelé "(rooted) Orienteering Problem" pour distinguer que le point de départ est fixé et "(unrooted) Orienteering Problem" pour le cas contraire. Plusieurs algorithmes traitent le second cas, tandis que le premier reste un problème ouvert "open problem" [Liang, et al. 2002].

L'OP est un problème NP-difficile ; la littérature des résolutions de l'OP se divise en deux catégories : les heuristiques et les méthodes exactes (Plus de détails dans [Keller 1989],[Tasgetiren et Smith, 2000], [Liang, 2002] pour les heuristiques et [Laporte et Martello, 1990] pour les méthodes exactes).

Dans notre cas, la ville de départ est fixée pour chaque spectacle (le Cirque est déjà dans une ville ; si c'est un nouveau spectacle la ville de départ est fixée aussi). Pour chaque spectacle, si on associe le profit de chaque ville à une durée type, et en traitant uniquement le paramètre nombre de villes, on se ramène à un OP pour chaque spectacle.

Team Orienteering Problem

Le TOP pour "Team Orienteering Problem" est une généralisation à plusieurs tournées du problème Orienteering Problem. L'objectif est de déterminer les clients (villes) à desservir de telle sorte que le profit réalisé soit maximum.

Le problème TOP ne permet pas les visites multiples (un client est desservi une seul fois). Ainsi, en se limitant à un période ne dépassant pas l'espacement minimal exigé, et en fixant les profits (c'est-à-dire les durées des présentations), notre problème est équivalent à un TOP pour le paramètre *nombre de villes.* Pour la calcul du profit, on se base sur la *durée* des présentations, on peut dire qu'on traite le paramètre *nombre de villes* en se basant sur le paramètre *durée.*

[Archetti, et al., 2005] propose des méta-heuristiques pour la résolution du TOP. Le lecteur d'avantage intéressé au TOP peut consulter cet article, ainsi que [Feillet, et al. 2004].

Prize-Collecting TSP

Dans l'Orienteering Problem, l'objectif est de maximiser les profits ; lorsque l'objectif est de minimiser le total des coûts de transport (total traveling cost) on parle du Prize-Collecting TSP, noté PC-TSP [Balas, 1989].

De même que l'OP, si on s'intéresse uniquement aux charges de transports et en ne traitant que paramètre *nombre de villes*, on se ramène à un PC-TSP pour chaque spectacle. Dans ce cas, on se base sur le paramètre *distance*, pour le calcul des coûts de transport, on peut dire qu'on traite le paramètre *nombre de villes* en se basant sur le paramètre *distance*.

Je n'ai pas trouvé de problème qui traite, soit disant, le paramètre *nombre de villes* en se basant sur le paramètre *espacement* pour déterminer les coûts. Je n'ai pas non plus trouvé d'articles qui traitent à la fois du choix d'un sous ensemble de villes parmi un ensemble de villes potentielles et du passage multiple autorisé dans certaines villes.

2.3 Conclusion

En absence, d'une modélisation complète du processus de décision, et en absence d'une formalisation complète du problème, la décomposition du problème en sous-problèmes s'avère nécessaire. Elle permettra au moins de modéliser une partie du processus et d'améliorer, voire optimiser (solution exacte), la planification des tournées du Cirque du Soleil.

CHAPITRE 3 : PROBLÈMES D'OPTIMISATION

Dans la première section de ce chapitre, on définit le problème d'optimisation qui est la planification des tournées du Cirque du Soleil. On s'intéresse à la fonction objective et à l'ensemble de contraintes à respecter. Dans la deuxième section, on détaille quatre problèmes issus des traitements séparés des critères ayant une influence sur la fonction objective.

3.1 Définition du problème d'optimisation "Planification des tournées du Cirque du Soleil"

Le Cirque du Soleil effectue des visites, à des villes, pour présenter des spectacles. Un profit est associé à chaque présentation. Ce profit dépend de la date et du nombre des représentations. Ce nombre des représentations dépend de la durée de la présentation (Cf. section 3.2.1). Ainsi, les dates déterminent les itinéraires et les espacements, et les durées déterminent les charges et les revenus de la billetterie. À noter que les durées influencent les dates.

L'objectif global est bien sûr de déterminer les dates et les durées de chaque présentation, de sorte à maximiser les profits. En d'autres termes, il faut planifier les tournées pour atteindre un profit optimal.

Dans ce qui suit, pour formaliser le problème d'optimisation, on définira en premier lieu la fonction objective, puis on détaillera l'ensemble des contraintes qui doivent être respectées selon les choix stratégiques du Cirque du Soleil.

3.1.1 Fonction objective

Dans cette étude, on se contente des critères quantitatifs "dates et durée" comme uniques paramètres influençant le profit. En fait, déterminer la date et la durée des présentations permet de calculer le profit.

Notons V et S (resp.) l'ensemble des villes et des spectacles (resp.). Notons, aussi, G (pour Gain) la fonction qui calcule le profit associé à une présentation et f la fonction objective correspondant au profit total.

La fonction G dépend de la durée et des dates des présentations. On note $P_i^{(k,q)}$ la q^{ieme} présentation du spectacle k dans la ville i et $G_i^{(k,q)}$ le profit qui lui est associé.

On a $G_i^{(k,q)} = G(Début_i^{(k,q)}, Fin_i^{(k,q)}, Durée_i^{(k,q)})$ où $Début_i^{(k,q)}$, $Fin_i^{(k,q)}$ et $Durée_i^{(k,q)}$ sont respectivement la date de début, la date de fin et la durée de $P_i^{(k,q)}$. L'indice $q \in \mathbb{k}^*$ est un entier strictement positif qui est utilisé pour distinguer les différents passages d'un même spectacle dans une ville ($\mathbb{k}^*$ représente l'ensemble des entiers strictement positifs).

À date, un ensemble de présentations déjà effectuées constitue l'historique des tournées. La fonction G prend en considération cet historique. Ceci signifie que l'espacement et les itinéraires sont pris en considération dans l'évaluation de G.

Notons V^k l'ensemble des villes pour lesquelles le spectacle k peut être présenté. Si i n'appartient pas à V^k, on ne peut pas présenter le spectacle k dans la ville i.

L'objectif est :

$$max\ f = \sum_{i,(k,q)} G_i^{(k,q)} X_i^{(k,q)}\ ;\ i \in V^k,\ k \in S,\ q \in \mathbb{k}^*, X_i^{(k,q)} \in \{0,1\} \tag{3.1}$$

où $X_i^{(k,q)}$ est une variable binaire qui vaut 1 si une q^{ieme} présentation du spectacle k est donnée dans la ville i et 0 sinon.

3.1.2 Contraintes

L'objectif est de maximiser les profits pour une période de planification (entre une date de début et une date de fin fixées d'avance) en visitant au moins N_k villes parmi un nombre M_k de villes potentielles pour chaque spectacle k ; tout ceci doit être réalisé en respectant les fenêtres de temps des villes. De plus, un espacement minimal est exigé entre deux visites successives dans une même ville et un spectacle k peut visiter une ville plusieurs fois.

Pour formaliser cette ensemble de contraintes, notons :

$Date_{début}$ et $Date_{fin}$ la date de début et la date de fin de la planification.

V_{min}^k le nombre de villes minimum exigé dans une tournée d'un spectacle k. Au moins V_{min}^k villes doivent être visitées entre $Date_{début}$ et $Date_{fin}$ pour le spectacle k.

$Espacement_{min}$ l'espacement minimum requis entre deux spectacles successifs.

$Durée_{min}$ la durée minimale de chaque présentation.

$Début_i^{(k,q)}$ et $Fin_i^{(k,q)}$ la date de début et la date de fin de $P_i^{(k,q)}$, respectivement.

$Durée_i^{(k,q)}$ la durée de la présentation $P_i^{(k,q)}$.

$[TW_i^1, TW_i^2]$ la fenêtre de temps durant laquelle une présentation peut être donnée dans la ville i.

On distingue les contraintes stratégiques produites par les choix des décideurs du

Cirque du Soleil et les contraintes dites de simulation nécessaires à la résolution du problème. Ces dernières contraintes sont générées par les objectifs attendus du système d'aide à la décision à réaliser.

Contraintes stratégiques

Une contrainte stratégique est une contrainte qui reflète la politique du Cirque du Soleil. Plusieurs contraintes sont recensées.

- Contraintes d'intégrité des données :

La durée d'une présentation est au plus la différence entre sa date de fin et sa date de début :

$$Fin_i^{(k,q)} - Début_i^{(k,q)} \geq Durée_i^{(k,q)} \;;\; \forall (i,k,q) \in V \times S \times \Bbbk^* \qquad (3.2)$$

La durée d'une présentation ne détermine pas sa date de fin sachant la date de début, c'est-à-dire qu'on n'a pas toujours l'égalité suivante: $Fin_i^{(k,q)}$ - $Début_i^{(k,q)} = Durée_i^{(k,q)}$

L'inégalité est due à l'existence de semaines creuses (sans spectacles).

- Contraintes de réalisabilité :

On ne peut visiter les villes que dans leurs fenêtres de temps autorisées :

Pour la date de début des présentations on a :

$$Début_i^{(k,q)} \geq TW_i^1;\; \forall (i,k,q) \in V \times S \times \Bbbk^* \qquad (3.3)$$

Pour la date de fin des présentations on a :

$$Fin_i^{(k,q)} \leq TW_i^2;\ \forall (i,k,q) \in V \times S \times \mathbb{k}^* \tag{3.4}$$

- Contraintes d'espacement :

Deux spectacles successifs dans une même ville doivent respecter l'espacement minimum. L'espacement est calculé par rapport aux dates de début des présentations, indépendamment de la durée. Les contraintes d'espacement s'énoncent comme suit :

$$\mid \textit{Début}_i^{(k',q')} - \textit{Début}_i^{(k,q)} \mid \geq \textit{Espacement}_{min}\ ;\ \forall i \in V\ \textit{et}\ (k,q) \neq (k',q') \tag{3.5}$$

- Contraintes de durée :

Une durée minimale est exigée pour les présentations. En effet, si on visite une ville, on doit au moins assurer une durée minimale pour chaque présentation, sinon on ne peut visiter cette ville. Cette contrainte ne peut être violée car ceci engendrerait un profit négatif pour les spectacles qui ne respectent pas cette durée minimale. Cette contrainte peut être écrite ainsi :

$$\textit{Durée}_i^{(k,q)} \geq \textit{Durée}_{min}\ ;\ \forall (i,k,q) \in V \times S \times \mathbb{k}^* \tag{3.6}$$

- Contraintes de cardinalité :

Le nombre de villes minimum exigé dans une tournée pour chaque spectacle k est donné par la contrainte suivante :

$$\sum_{i,(k,q)} X_i^{(k,q)} \geq V_{min}^k\ ;\ \forall k \in S \tag{3.7}$$

Contraintes générales de simulation

Une contrainte de simulation est une contrainte générée pour bien mener ce projet. L'objectif de ces contraintes est de permettre aux décideurs du Cirque de Soleil de paramétrer leurs choix et construire un maximum d'alternatives possibles. Les principales contraintes portent sur la période de simulation et sur les modifications qu'il est possible d'apporter à une planification initiale.

- Les spectacles doivent se terminer avant $Date_{fin}$:

$$Fin_i^{(k,q)} \leq Date_{fin} \; ; \; i \in V, k \in S, q \in \Bbbk^* \tag{3.8}$$

- Les spectacles ne peuvent pas commencer avant $Date_{début}$:

$$Début_i^{(k,q)} \geq Date_{début} \; ; \; i \in V, k \in S, q \in \Bbbk^* \tag{3.9}$$

D'autres contraintes de simulation liées aux paramètres seront exhibées lorsque ces paramètres seront traités.

3.2 Problèmes d'optimisation

La fonction objective dépend de paramètres qui sont foncièrement multiples. On ne peut ni traiter le problème dans sa totalité ni résumer ces paramètres à un seul critère. De plus, il n'existe pas de mesure de l'objectif global faisant l'unanimité de tous les choix et qui résume l'objectif.

L'approche adoptée consiste à construire autant d'objectifs que de critères d'évaluation. Cette modélisation ne permet malheureusement pas d'optimiser simultanément tous les objectifs. Par conséquent, il n'y a pas de solution unique. Cependant, la force de cette approche réside dans la maîtrise de chaque paramètre pris indépendamment et de ce fait le développement d'une vue globale en se basant sur une analyse de la sensibilité.

Dans la suite on définit les 4 problèmes d'optimisation issus du problème global.

3.2.1 Durée

La *durée* est le paramètre qui influence le plus les profits. D'une part, les revenus de la billetterie dépendent du nombre de représentations. D'autres part, les charges dépendent des dates de début et de fin d'une présentation ainsi que du nombre de représentations. Par durée, on désigne le nombre de semaines actives durant lesquelles un spectacle est donné. Étant donné que le nombre de représentations par semaines est une donnée dépendante de la classe de la ville (une séquence de représentations par type de ville), le nombre de semaines actives détermine le nombre de représentations par semaine et par conséquent le profit de la billetterie ainsi que les charges qui lui sont associées.

Lorsqu'on ne traite que du paramètre *durée*, il vaut la peine de décomposer le gain $G_i^{(k,q)}$ en une somme $A_i^{(k,q)} + B_i^{(k,q)}$ où $A_i^{(k,q)}$ est le profit généré par $P_i^{(k,q)}$ et ne dépendant pas de la durée, alors que $B_i^{(k,q)}$ est la contribution de la durée de $P_i^{(k,q)}$ au profit total.

La fonction f à optimiser (voir équation 3.1) peut alors s'écrire $f = A + f_{durée}$ où :

- $A = \sum_{i,(k,q)} A_i^{(k,q)} X_i^{(k,q)}$ est le profit total ne dépendant pas de la durée des présentations.

- $f_{durée} = \sum_{i,(k,q)} B_i^{(k,q)} X_i^{(k,q)}$ est le profit total dépendant des durées des présentations.

Comme A est une constante lorsqu'on n'optimise que le paramètre *durée*, le problème d'optimisation revient à maximiser $f_{durée}$.

3.2.2 Distance

La *distance* est le paramètre qui permet de tracer l'itinéraire des tournées. Optimiser la distance revient à diminuer les coûts des charges de transport.

Une présentation $P_{i'}^{(k,q')}$ est la suivante à $P_i^{(k,q)}$ pour le même spectacle k si $i \neq i'$ et il n'existe pas d'autre présentation du spectacle k entre $Fin_i^{(k,q)}$ et $Début_{i'}^{(k,q')}$.

Même si le coût de transport ne concerne pas uniquement $P_i^{(k,q)}$, car il dépend de la présentation $P_{i'}^{(k,q')}$ suivant $P_i^{(k,q)}$ pour le spectacle k, on associe le coût de transport uniquement à $P_i^{(k,q)}$ pour besoin de formulation. La dernière ville à visiter dans une tournée a un coût de transport nul.

Cette fois-ci on peut décomposer $G_i^{(k,q)}$ en une différence $A_i^{'(k,q)} - C_i^{(k,q)}$ où $A_i^{'(k,q)}$ est le profit engendré par $P_i^{(k,q)}$ sans tenir compte des coûts de transport, $C_i^{(k,q)}$ est le coût de transport pour se rendre de la ville i a la ville i' telle que $P_{i'}^{(k,q')}$ succède à $P_i^{(k,q)}$.

On a ainsi $f = A' + f_{distance}$ où :

- $A' = \sum_{i,(k,q)} A_i^{'(k,q)} X_i^{(k,q)}$ est le profit total sans tenir compte des coûts de transport.

- $f_{distance} = \sum_{i,(k,q)} C_i^{(k,q)} X_i^{(k,q)}$ est le coût total de transport.

Comme A' est une constante lorsqu'on n'optimise que le paramètre *distance*, le problème d'optimisation revient à minimiser $f_{distance}$.

Pour ce paramètre *distance*, nous n'avons considéré que les coûts de transport. Une vision plus prometteuse consisterait à intégrer le temps. En effet, en minimisant les distances, on gagne du temps ; ce temps peut être réutilisé pour effectuer des représentations et ainsi générer des gains.

3.2.3 Espacement

Pour mesurer l'*espacement*, notre choix s'est porté sur une fonction de pénalité mise au carré. Cette fonction a pour objectif de pénaliser les petits espacements ainsi que les grands espacements (Cf fig 3.1). La tendance sera de se rapprocher le maximum possible de l'espacement idéal de chaque ville. Ainsi, si l'espacement idéal d'une ville est de 2 ans, l'idéal pour cette ville est de programmer un spectacle tous les deux ans.

La fonction de pénalité associée à chaque ville i s'écrit $\xi_i(x) = Q \times (x - Ideal_i)^2$ où Q est une constante et $Ideal_i$ est l'espacement idéal pour i. La pénalité d'une présentation $P_i^{(k,q)}$ est calculée par rapport à la présentation $P_i^{(k',q')}$ qui la précède.

Par rapport à l'espacement, la présentation $P_i^{(k',q')}$ précède $P_i^{(k,q)}$ si : $k = k'$ et $q = q' + 1$ ou $k \neq k'$, et il n'existe pas d'autre présentation dans la ville i entre $Fin_i^{(k',q')}$ et $Début_i^{(k,q)}$.

On utilise les dates de début des présentations pour calculer les écarts. On note $E_i^{(k,q)} = \xi_i(Début_i^{(k,q)} - Début_i^{(k',q')})$ où $P_i^{(k',q')}$ est la présentation qui précède $P_i^{(k,q)}$.

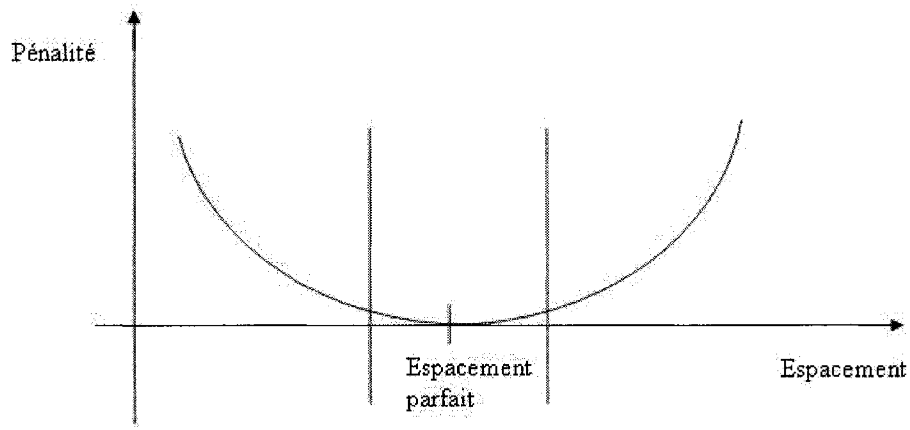


Figure 3.1: Fonction de pénalité.

Si une ville est planifiée pour la première fois dans une tournée (spectacle), la pénalité est nulle (l'historique est considéré).

on a $G_i^{(k,q)} = A_i^{''(k,q)} - E_i^{(k,q)}$ où $A_i^{''(k,q)}$ est le profit de $P_i^{(k,q)}$ sans tenir compte du paramètre *espacement*.

On a $f = A'' - f_{espacement}$ où :

- $A'' = \sum_{i,(k,q)} A_i^{''(k,q)} X_i^{(k,q)}$ est le profit total sans tenir compte du paramètre *espacement*.
- $f_{espacement} = \sum_{i,(k,q)} E_i^{(k,q)} X_i^{(k,q)}$ est la pénalité totale liée a l'espacement.

L'objectif cette fois-ci revient à minimiser $f_{espacement}$ car A'' est une constante lorsqu'on n'optimise que la paramètre espacement.

Le choix de Q est primordial. En effet le choix d'une valeur Q petite a pour conséquence de négliger le paramètre espacement ; tandis que pour une grande valeur de Q l'espacement devient rigide, car le seul moyen de minimiser la pénalité est de converger vers l'espacement idéal.

Remarquons que la mesure de l'espacement ne fait aucune différence entre les passages d'un nouveau spectacle et d'un ancien spectacle qu'on a déjà présenté dans une ville. En réalité, il y a une différence, mais celle-ci n'a pas été prise en compte dans le cadre de ce projet.

3.2.4 Nombre de villes

Le paramètre *nombre de villes* consiste à déterminer le nombre optimal de villes à visiter pour chaque spectacle de sorte à maximiser le profit dans une période de temps. La formulation de la fonction objective reste informelle du fait que tous les critères d'optimisation sont actifs et participent donc dans le calcul du profit. Cette complexité a pour origine la dépendance du profit de la ressource temps et la possibilité de passages multiples des spectacles dans une même ville.

Les contraintes de cardinalité (nombre de villes minimum exigé dans une tournée d'un spectacle k) définissent une borne inférieure du nombre de villes (V^k_{min}) qui doivent exister dans chaque tournée . Du fait que les simulations s'effectuent sur une période limitée, le nombre maximum, noté V^k_{max}, peut être déduit puisque les contraintes de durée fixent la durée minimale des présentations. Le nombre de villes varie alors dans un intervalle déterminé (le nombre de ville est un entier).

Le paramètre *nombre de villes* a été pris en compte lors de la phase II, son rôle principal étant de diversifier les possibilités issues de la phase I de ce projet. En effet, en changeant le nombre de villes dans une planification, toutes les solutions proposées selon un des trois autres paramètres changent aussi. Plusieurs alternatives peuvent alors être générées et par la suite le choix de la meilleure planification peut être fait sur un large éventail de solutions qu'on peut comparer entre elles.

On peut résumer ce paramètre à la génération de planifications réalisables (vérifiant toutes les contraintes) avec un nombre déterminé de villes dans chaque tournée. Ainsi, pour chaque tournée k et pour chaque entier l^k qui varie entre V^k_{min} et V^k_{max}, on génère une ou plusieurs planifications avec exactement l^k villes dans la tournée k. L'optimisation se fait alors grâce aux trois autres paramètres.

3.2.5 Conclusion

Nous avons ramené le problème de planification des tournées du Cirque du Soleil à résoudre les quatres problèmes d'optimisation pour chacun des paramètres *Durée*, *Distance*, *Espacement* et *Nombre de villes.*

Pour résoudre ces problèmes, la première étape consiste à analyser et traiter les données nécessaires. Les deux chapitres suivants s'intéressent à ce volet.

CHAPITRE 4 : ANALYSE DES TOURNÉES ACTUELLES (POTENTIEL D'OPTIMISATION)

La première étape de ce projet consistait à vérifier si des pistes d'optimisation prometteuses existaient. L'existence de telles pistes, a permis la mise en place d'une collaboration entre le Cirque du Soleil et le GERAD. Dans cette étape, dite analyse préliminaire, l'objectif principal était de tester si les tournées planifiées pouvaient être améliorées. Pour ce faire, une analyse approfondie des données a été effectuée. Cette analyse avait pour objectif de cerner un ensemble de paramètres influençant les profits des tournées.

Une description globale de l'analyse préliminaire effectuée pour dépister des paramètres potentiels d'optimisation fait l'objet de ce chapitre. Dans la première section, on détaille l'analyse des données, et dans la deuxième section on détaille les paramètres d'optimisation.

Les dates parfaites des présentations et les dates interdites ne sont pas traitées dans cette analyse préliminaire. Elles reflètent les contraintes à respecter. Pour s'assurer que les nouvelles planifications générées ne placent pas des présentations à de mauvaises dates dans certaines villes, nous avons décidé de limiter les ajustements qui peuvent être faits sur la planification courante.

4.1 Analyse des données

Dans cette section, on présente les différents types de données grâce auxquelles l'analyse préliminaire a été effectuée. On s'intéresse aux revenus de la billetterie, aux dates des présentations et aux itinéraires des différents spectacles. Du plan global d'une tournée, jusqu'au détail d'une présentation, on survole les données, leurs interprétations, et leur visualisation, pour en déduire les améliorations possibles.

Le tableau 4.1 montre un extrait d'une planification d'une tournée. On peut en déduire l'itinéraire, les dates et le nombre de représentations par semaine. Chaque spectacle possède sa propre planification future ainsi que l'historique de ses présentations antérieures. L'analyse de chaque spectacle pris indépendamment permet des améliorations possibles en ne modifiant que les itinéraires, et par conséquent les dates des présentations. Le premier paramètre ainsi dépisté est la *distance.*

Tableau 4.1: Extrait d'une planification.

2005	Premiere	Last	Shows	Spectators at target	Spectators last time around	Occupancy last time	# avail seats	% sold	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Days	Weeks
Montreal	Thu Apr 21	Sun Jun 12	69			[illegible]	2,613	0%	6	9	9	9	9	9	9	9					53	7.6
Quebec City	Thu Jun 23	Sun Jul 17	33			[illegible]	2,613	0%	6	9	9	9									25	3.6
Toronto	Thu Jul 28	Sun Sep 4	49			[illegible]	2,613	0%	6	9	9	8	9	8							39	5.6
Annual Leave	*Mon Sep 5*	*Sun Sep 18*																		*	13	1.9
Santa Monica	Fri Sep 23	Sun Nov 27	85			[illegible]	2,613	0%	4	9	9	9	9	9	9	9	9	9			65	9.3
Orange County	Thu Dec 8	Sun Dec 25	24			[illegible]	2,613	0%	6	9	9										20	2.9
			260			87.83%		0%													215	30.714

En s'intéressant à un spectacle et à partir d'une planification courante (tab 4.1), le nombre de semaines et de jours (la durée d'un spectacle) et le nombre de représentations par semaine ainsi que le nombre total des représentations peuvent être déduits ; toutefois l'analyse de ces paramètres, liés à la durée, nécessite un niveau plus détaillé que la planification globale.

En s'intéressant cette fois-ci à une ville particulière, on peut visualiser les spectacles qui ont visités cette ville, ainsi que leurs dates. Dans le tableau 4.2, un extrait des noms et des dates des spectacles par ville est listé à titre d'exemple. On peut en déduire les fréquences des visites et les spectacles qui sont présentés plus d'une fois. Ainsi, l'interaction, dans une même ville, entre les spectacles peut être déduite.

Tableau 4.2: Extrait des spectacles par ville.

	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Albuquerque / Tucson													
Atlanta		Saltimbanco Nov - Dec		Alegria Nov - Dec			[illegible]		Dralion Nov 2000 - [illegible]			Varekai Mar - Apr	Alegria Mar - Apr
Biloxi / Memphis								Alegria May - Dec	Alegria Jan - Oct				
Boston		Saltimbanco Sept - Oct		Alegria Sep - Oct						Dralion Aug - Sep	[illegible]		Varekai Jul - Sep

Une description moins détaillée que le tableau 4.2 est donnée dans le tableau 4.3. Elle s'intéresse aux fréquences des spectacles dans une même ville. En plus, elle permet de calculer l'espacement moyen entre les spectacles successifs. En modifiant les dates des présentations pour aboutir à des espacements réguliers idéaux, les profits changent : on parle ici du paramètre *espacement*.

Tableau 4.3: Extrait des fréquences de l'*espacement*.

Villes	espacement moyen	frequence espacement pour 1992-2004			
		1	2	3	4+
Atlanta	2.2	1	2	2	0
Austin	2.2	1	2	2	0
Boston	2.75	1	2	0	1
Chicago	2.5	0	2	2	0
Orange County	2.75	0	3	0	1
Philadelphia	1.5	1	1	0	0
Seattle	1.5	1	1	0	0
Vancouver	1	1	0	0	0

D'autres données liées à la ville et à ses caractéristiques tel que la population, le succès des spectacles précédents et les taux d'occupation etc... reflètent plus le choix des villes potentielles. Ces données ne sont pas prises en considération dans cette analyse préliminaire.

L'exemple décrit dans la tableau 4.4 montre un extrait de données recueillés lors d'une présentation. Il présente les statistiques d'une semaine. Les données financières sont mises à zéro pour qu'elles restent confidentielles.

Tableau 4.4: Extrait des revenus par présentation.

Lead Day		FINAL		Qty Avail.	Average tix price	Qty Sold	Amount Sold	Qty Comp.	Qty Acc.comp.	Qty IdFav	Qty IdPay	Qty Rsv	Qty Obst	Total Occupancy	% Sold & Acc.comp.	% Occupancy
	MAR	5/27/2003	20:00	0	- $	2385	-	90	69	0	0	0	0	2544	96.46%	100.00%
	MER	5/28/2003	20:00	0	- $	2399	-	46	99	0	0	0	0	2544	98.19%	100.00%
	JEU	5/29/2003	16:00	354	- $	2111	-	69	10	0	0	0	0	2190	83.37%	86.08%
	JEU	5/29/2003	20:00	0	- $	2306	-	132	106	0	0	0	0	2544	94.81%	100.00%
	VEN	5/30/2003	16:00	73	- $	2397	-	67	7	0	0	0	0	2471	94.50%	97.13%
	VEN	5/30/2003	20:00	0	- $	2150	-	74	320	0	0	0	0	2544	97.09%	100.00%
	SAM	5/31/2003	16:00	1	- $	2399	-	127	17	0	0	0	0	2543	94.97%	99.96%
	SAM	5/31/2003	20:00	0	- $	2416	-	109	19	0	0	0	0	2544	95.72%	100.00%
	DIM	6/1/2003	13:00	0	- $	2438	-	79	27	0	0	0	0	2544	96.89%	100.00%
	DIM	6/1/2003	17:00	0	- $	2444	-	76	24	0	0	0	0	2544	97.01%	100.00%

À partir de ce tableau, les revenus hebdomadaires moyens peuvent être calculés pour chaque présentation. On en déduit aussi le nombre de représentations par semaine et leurs dates. Les revenus sont étroitement liées aux nombres de semaines (la durée) et aux nombres de représentations (show). Le paramètre *durée* combinant le nombre de représentations et le nombre de semaines est le paramètre le plus influant.

4.2 Pistes d'optimisation

Afin de vérifier si les tournées planifiées peuvent être améliorées, l'analyse a porté sur les données des tournées déjà effectuées. Des petits changements ont été effectués sur les planifications du Cirque du Soleil et les résultats obtenus se sont avérés prometteurs. À partir des données, des courbes ont été réalisées afin de visualiser les variations. En plus, deux petits programmes pour étudier les paramètre *distance* et *durée* ont été réalisés.

4.2.1 Distance

Le premier facteur d'optimisation potentiel recensé a été la *distance*. En traitant uniquement le paramètre distance, le problème se ramène à un problème de voyageur de commerce TSP. Ainsi, un petit programme se basant sur le plus proche voisin NN (Nearest Neighbour) pour résoudre le TSP a été réalisé.

L'algorithme du plus proche voisin NN (Nearest Neighbour) est un algorithme glouton : c'est un algorithme qui fait un choix à chaque étape, sans jamais remettre en cause ce choix. cet algorithme est parfois utilisé comme point de départ pour d'autres méthodes.

Algorithme 4.1 Algorithme plus proche voisin

1. choisir une première ville au hasard.
2. construire un chemin en allant vers la ville la plus proche n'appartenant pas déjà au chemin.

Dans notre cas, la première ville n'est pas choisie au hasard, elle est définie par la date de début de la planification. En effet, s'il s'agit d'un nouveau spectacle, la ville de départ est par défaut la ville de Montreal (choix du Cirque du Soleil), et s'il s'agit d'un spectacle en tournée, la ville de départ est la dernière ville visitée. Ainsi, on construit un chemin en partant de la ville de départ et en allant vers la ville la plus proche n'appartenant pas déjà au chemin jusqu'à ce que toutes les villes soient visitées.

La distance est le total des milles à parcourir lors d'une tournée pour un spectacle. L'optimisation de la distance permet de :

- gagner du temps qu'on peut programmer pour d'autres présentations de ce spectacle.
- réduire les frais de transport.

Des gains possibles allant de 5% à 40% sont obtenus. Deux alternatives pour les résultats sont livrées. Une première alternative qui consiste à changer l'itinéraire des spectacles de chaque année prise individuellement : il s'agit du plan annuel. La deuxième alternative traite la planification globale dans sa totalité. La tableau 4.5 illustre un extrait de ces résultats.

Tableau 4.5: Exemple de résultats pour la *distance*.

les distances sont en milles			
alternative 1 : Plan global			
alternative 2 : Plan annuel			
Cirque 2005			
2005 - 2009	Plan propose	alternative 1	alternative 2
distance totale	18822	11141	17449
milles gagnes		7681	1373
% reduit		40.8086282	7.294655191
Cirque 2007			
2007 - 2009	Plan propose	alternative 1	alternative 2
distance totale	9384	7212	8936
milles gagnes		2172	448
% reduit		23.14578005	4.774083546

4.2.2 Espacement

L'*espacement* est la moyenne des durées entre les visites successives d'une ville. L'optimisation de l'espacement permettra d'assurer une grande audience pour chaque ville, soit un meilleur revenu. Pour chaque ville on définit son espacement moyen (tab 4.3).

En analysant l'espacement en fonction du revenu (fig 4.1), l'espacement trop long et l'espacement trop court dégradent le revenu. En effet, un espacement trop long exige des investissements en publicité pour faire reconnaître les spectacles alors qu'un espacement trop court fait perdre de l'audience.

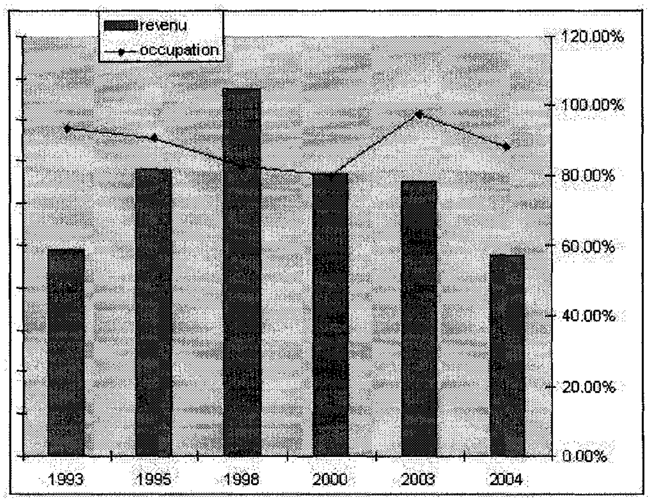


Figure 4.1: Variation du revenu en fonction de l'espacement

4.2.3 Durée

Le troisième paramètre est la *durée* d'une présentation. Elle représente le nombre de jours durant lesquels le spectacle associé à cette présentation est présenté dans une ville. Elle est calculée en nombre de semaines. L'optimisation de la durée permet d'assurer une grande audience pour chaque ville à chaque présentation. Pour chaque ville et chaque spectacle on définit une durée moyenne. Le nombre de représentations par semaine est lié au nombre de semaines et à la grandeur de la ville (petite ville ou grande ville).

Pour chaque ville et chaque spectacle, on a considéré l'audience hebdomadaire lors de la dernière semaine de représentation.

Pour prolonger un spectacle dans une ville, on doit raccourcir le même spectacle dans une autre pour ne pas changer la durée totale de la planification. Ainsi, si on ajoute une semaine à une présentation, on doit déduire une semaine d'une autre.

Afin de visualiser le potentiel d'optimisation pour le paramètre durée, on a présenté des courbes de revenu en fonction de la durée (fig 4.2). L'exemple de la figure 4.3 montre une permutation d'une semaine entre la ville de Vancouver et de Seattle (deux villes possédant les mêmes caractéristiques et qui sont classées dans la même catégorie par le Cirque du Soleil). On en déduit les profits prometteurs.

Les figures 4.2 et 4.3 montrent les revenus de la billetterie en fonction de la durée du même spectacle dans les villes de Vancouver et de Seattle avant et après changement.

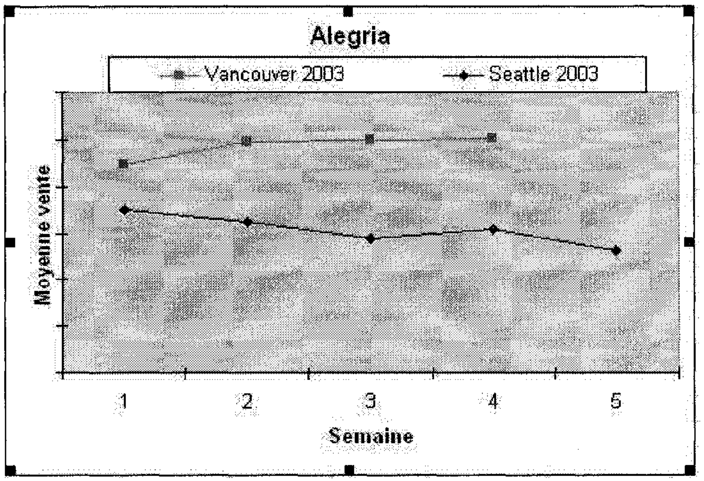


Figure 4.2: Exemple de revenu en fonction de la *durée* avant changement.

En deuxième étape, un programme permettant d'ajouter ou d'enlever une semaine à une présentation a été réalisé. À chaque étape, on ajoute une semaine à une présentation et on déduit une semaine d'une autre présentation ; les deux présentations concernent le même spectacle. Ce programme se base sur une recherche exhaustive. Il liste toutes les possibilités et calcule les profits. Ce programme ne peut traiter plus que dix villes (environ un plan de deux années si on traite un seul spectacle). L'objectif de ce programme était d'approuver les résultats déduits des graphes de revenu en fonction de la durée (fig 4.3).

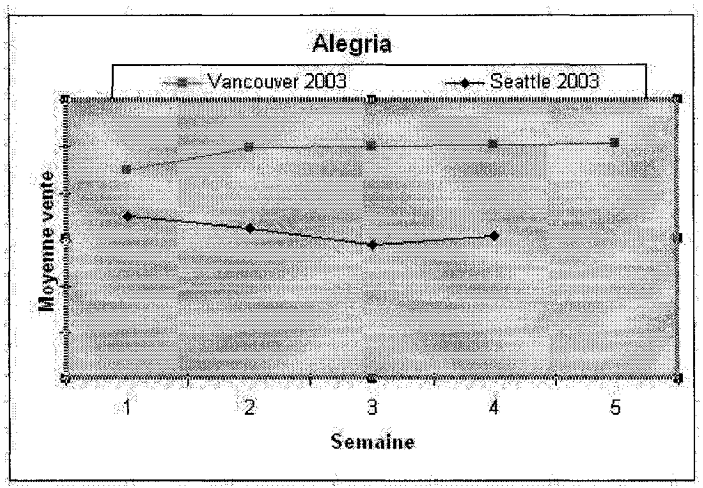


Figure 4.3: Exemple de revenu en fonction de la *durée* après changement.

4.3 Conclusion

Grâce à cette analyse préliminaire, les trois pistes d'optimisation qui sont la *durée* , la *distance* et l'*espacement* sont choisis comme paramètres les plus influents. L'accord avec le Cirque du Soleil pour optimiser ses tournées en se basant uniquement sur ces trois paramètres a fait l'objet de la "Phase I" comme début de la collaboration entre le Cirque du Soleil et le GERAD. Une première étape consistait à préparer les données nécessaires à l'optimisation avant de traiter les problèmes d'optimisation. Cette préparation de données fait l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE 5 : DONNÉES

Dans ce chapitre, on décrit les données nécessaires à l'optimisation. La première section est consacrée aux revenus issus de la billetterie, tandis que la seconde partie est consacrée aux charges. La troisième partie traite les distances inter-villes et la quatrième partie traite les fenêtres de temps des villes.

5.1 Courbes de revenu

Des statistiques et des données ont été collectées pour chaque présentation effectuée. L'analyse de ces données (historique) a permis de conclure que les revenus de la billetterie dépendent étroitement de la ville où le spectacle est programmé et que le degré de dépendance de la nature du spectacle lui-même est presque nul. Ainsi, créer un profil de vente pour chaque ville s'avère une étape essentielle pour estimer les revenus futurs et ce pour bien planifier les tournées du Cirque du Soleil.

L'objectif est de générer un profil de vente de billets, pour chaque ville, sur la base de l'historique des ventes. Ce profil permettra de prédire les ventes pour les spectacles qui doivent être planifiés. Ainsi, pour la période allant de 1992 à 2005 ; pour chacune des 43 villes potentielles (il y avait des statistiques de 43 villes potentielles au commencement de l'étude préliminaire, actuellement [1] le nombre est de 63 villes) et pour chacun des cinq spectacles (actuellement 6 spectacles), des courbes de revenus ont été générées. Ce qui fait un total d'environ 200 courbes de revenus.

En réponse à des requêtes spécifiques, à la demande des responsables du Cirque du Soleil, des courbes comparatives combinant des représentations pour des villes

[1] date du 31 décembre 2005

spécifiques, ont été réalisées. Ces nouvelles courbes ainsi générées ont pour objectif de bien cerner le comportement de chaque ville vis-à-vis de ses villes voisines pour le même spectacle.

L'exemple ci-dessous (fig 5.1) illustre les courbes des revenus de la ville de Montréal.

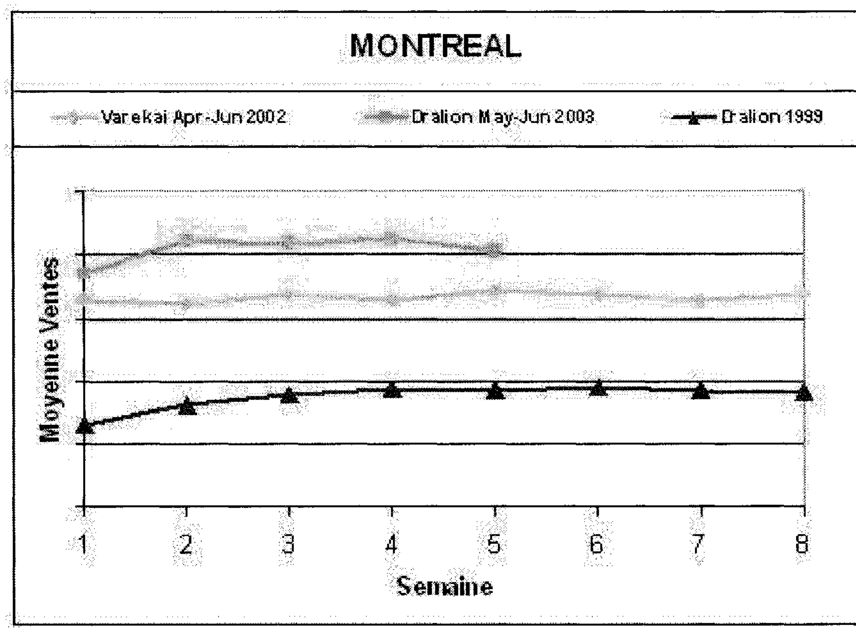


Figure 5.1: Courbes des revenus de Montréal.

Sur ces courbes, les revenus moyens de la billetterie de trois spectacles (Dralion 1999, Varekai 2002, Dralion 2003) sont représentés en fonction du nombre de semaines. Les chiffres et leur ordre de grandeur sont confidentiels sur demande du Cirque du Soleil.

L'exemple ci-dessous (fig 5.2) illustre un exemple de courbes comparatives.

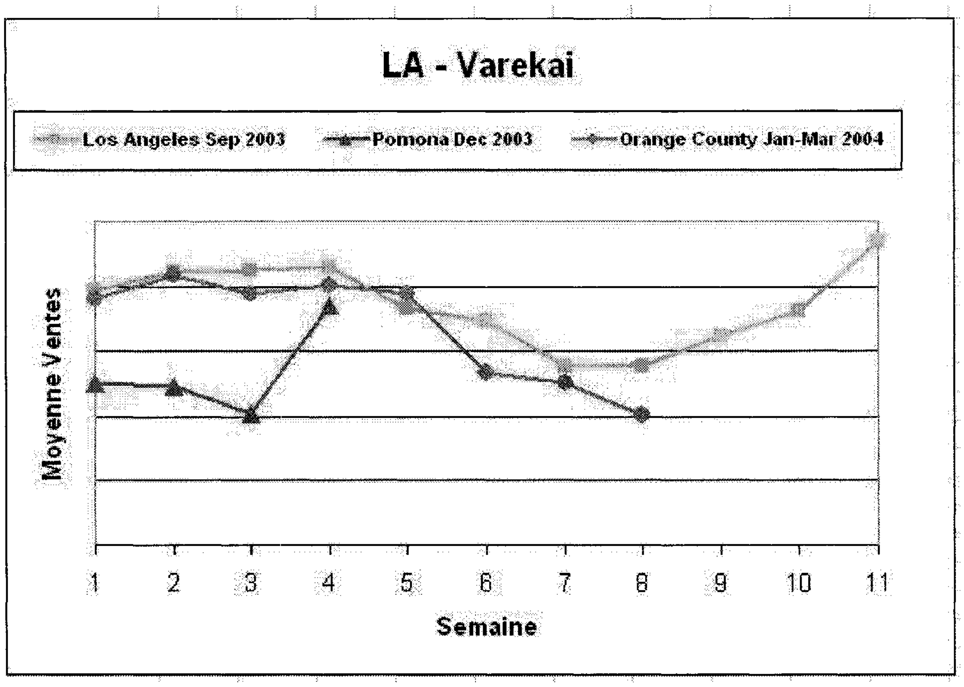


Figure 5.2: Courbes comparatives de Los Angeles pour Varekai.

Sur ces courbes, les revenus moyens de la billetterie du spectacle Varekai dans trois villes voisines (Los Angeles 2003, Pomona 2003, Orange County 2004) sont représentés en fonction du nombre de semaines. Les chiffres et leur ordre de grandeur restent à nouveau confidentiels.

En plus des courbes comparatives, pour chaque spectacle et pour des villes voisines, nous avons produit, pour chaque ville, un fichier illustrant les courbes de revenus des villes. Ces courbes ont permis aux responsables du Cirque du Soleil de tracer une nouvelle courbe par ville, dite "courbe type de revenu", illustrant le comportement modèle des revenus de chaque ville. À ce stade, les profits deviennent indépendants du spectacle et totalement dépendants de la ville et de ses caractéristiques.

L'exemple ci-dessous (fig 5.3) illustre la "courbe type de revenu" de la ville de Montréal tracée par les responsables du Cirque du Soleil.

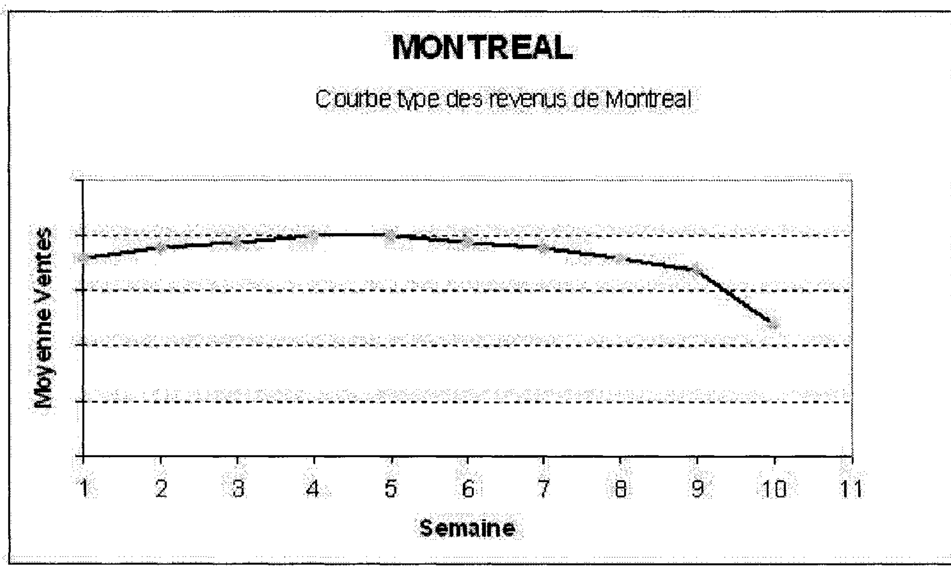


Figure 5.3: Courbe type de revenu de Montreal.

A partir des "courbes type de revenu", on a estimé le revenu hebdomadaire moyen par représentation (show) de chaque ville. L'objectif est de faire en sorte que le revenu soit lié à la ville et totalement indépendant des spectacles et des dates des présentations. Ainsi, on dit que la courbe obtenue représente la courbe type des revenus.

Pour simuler ces revenus, on a utilisé une fonction affine par morceaux pour décrire analytiquement cette courbe type de revenu. Un revenu hebdomadaire moyen RM_i^m par représentation est déduit de la "courbe type de revenu" pour chaque ville i et pour chaque semaine m. Ainsi, le revenu hebdomadaire d'une semaine spécifique est le produit du nombre de représentations (show) et du revenu hebdomadaire moyen par représentation de cette semaine.

Le nombre de représentations par semaine est une donnée qui dépend de la ville. Les séquences possibles sont liées à la durée. Pour chaque durée et chaque ville, une seule séquence possible est établie. À titre d'exemple si on décide de rester dans une petite ville 4 semaines, la séquence correspondante sera (6 9 9 9) indiquant que pour la première semaine il y aura 6 représentations, pour la deuxième semaine il y aura 9 représentations, pour la troisième semaine il y aura 9 représentations, et pour la quatrième semaine il y aura 9 représentations aussi.

Le revenu hebdomadaire de la ville i à la semaine m est $R_i^m = RM_i^m \times N_i^m$ où N_i^m est le nombre des représentations dans la semaine m à la ville i .

Le revenu total de la ville i est $R^i = \sum_m R_i^m$.

5.2 Charges

Trois types de charges influencent le profit. Premièrement, on a les charges fixes qui sont liées au site. Elles se composent des coûts de la location du site, de la construction du chapiteau et de l'aménagement du parking. Ces coûts sont notés CF_i (pour coût fixe) pour chaque ville i. Deuxièmement, on trouve les charges variables qui sont liées à la durée et au nombre de représentations dans une présentation. Ces charges sont notées CV_i^m (pour coût variable) pour chaque semaine m et chaque ville i. CV_i désigne les charges variables totales de la ville i. Différents paramètres, environ une vingtaine, participent au calcul de CV_i^m (sécurité, cuisine, costumes, billetterie, ...). Un aperçu est donné à la figure 5.4. Les CV_i^m sont des fonctions affines.

On note $CV_i = \sum_m CV_i^m$ le total des coûts variables et $C_i = CF_i + CV_i$ la charge totale de la ville i.

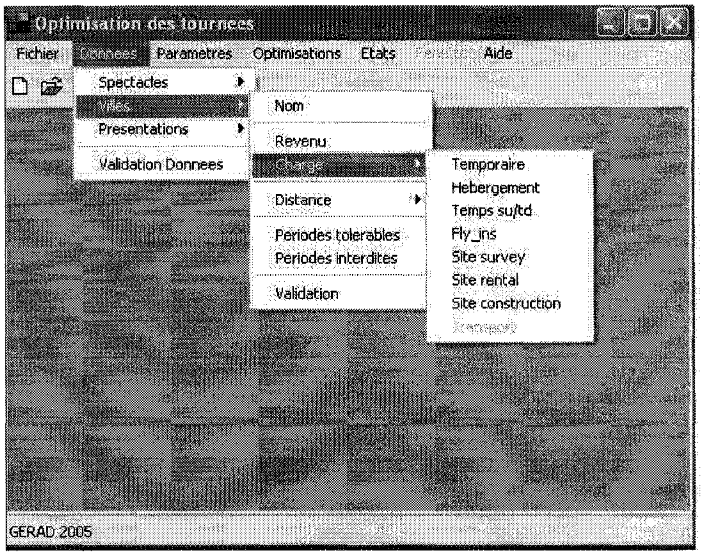


Figure 5.4: Extrait des paramètres charge.

Troisièmement, on a les coûts de transport qui sont liés à l'itinéraire de chaque tournée. Ces charges notées CT (pour coût transport) sont calculées pour chaque tournée et non pour chaque ville.

Le Cirque du Soleil possède une flotte de N camions. Pour chaque déplacement d'une ville i vers une ville j, le coût de transport est calculé par la fonction $ct(i,j)$.

Si d_{ij} représente la distance entre la ville source i et la ville destination j ($d_{ij} = d_{ji}$), on a :

$$ct(i,j) = \begin{cases} N \times a \times d_{ij} + b & \text{si } d_{ij} \geq D \\ & \text{sinon} \end{cases}$$

a, b, c, D *et* N sont des données confidentielles.

On note CT^k le coût total des charges de transport pour une spectacle k et $CT =$

$\Sigma_k\ CT^k$ le coût total de toutes les tournées (spectacles).

5.3 Distances inter-villes

Pour les 43 premières villes, les distances entre les villes sont calculées grâce aux sites web :

- http://www.geobytes.com/CityDistanceTool.htm
- http://www.dingbatway.com/mileage/mileage-between.html

Les distances ont été saisies une à une. Nous avons donc effectué exactement 903 (43*(43 - 1)/ 2) recherches.

Pour l'ajout d'une nouvelle ville, un outil permettant d'approximer les distances a été implémenté (fig 5.5). Il suffit de choisir parmi les villes appartenant déjà à la base des données (actuellement 60 villes), les cinq villes (au plus cinq) les plus proches qui entourent cette nouvelle ville, et les distances par rapport au reste des autres villes sont calculées automatiquement d'une manière statique. En effet, la distance entre une nouvelle ville i nouvellement insérée dans la base de données des villes et une ville j faisant partie de cette base se calcule de la manière suivante :

Soit $(i_1, i_2, i_3, i_4, i_5)$ les villes qui entourent la villes i. Si j fait partie des cinq villes qui entourent la ville i alors la distance est déjà donnée ; sinon on a

$$d_{ij} = d_{ji} = min(d_{ii_1} + d_{i_1j}, d_{ii_2} + d_{i_2j}, d_{ii_3} + d_{i_3j}, d_{ii_4} + d_{i_4j}, d_{ii_5} + d_{i_5j}).$$

On peut toujours mettre à jour les distance de manière manuelle. Il suffit de sélectionner les deux villes désirées et puis faire entrer la valeur (fig 5.6). À noter que les distances sont en milles.

Figure 5.5: Mise à jour automatique des distances.

5.4 Fenêtres de temps des villes

Par fenêtre de temps des villes on désigne les périodes idéales durant lesquelles on peut présenter un spectacle.

On s'est basé sur la disponibilité des sites et sur les conditions météo pour déterminer les périodes idéales. L'intersection entre les périodes idéales du site (tab 5.1) et les périodes non interdites des conditions météo (fig 5.7) représente la fenêtre de temps de la ville. Il se trouve parfois que dans cette fenêtre de temps, il existe des dates interdites. Ces dates interdites sont mentionnées afin de réduire le profit global si des représentations coïncident avec ces dates.

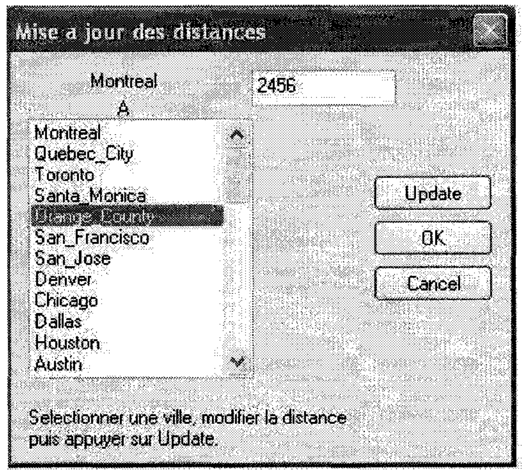


Figure 5.6: Mise à jour manuelle des distances.

Tableau 5.1: Extrait de la disponibilité des sites.

Denver (Pepsi Center)	May 1, 2005 to August 9, 2005	as stipulated in contract & preferred site
	May 1, 2006 to August 10, 2006	
San Francisco (PacBell Stadium)	November 16 to March 28	as stipulated in contract & preferred site
		possibility to get site earlier, i.e. end of October
Phoenix (Tempe Diablo Stadium)	October 15 to December 31	as stipulated in contract & preferred site
		show may not be presented prior to 1st Sunday of November
St. Petersburg (Tropicana Field)	October 15 to March 28	as stipulated in contract & preferred site

	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	Warning *
ATLANTA, GA													tornado
AUSTIN, TX													tornado (high)
BALTIMORE, MD								PEAK	PEAK				hurricane
BOSTON, MA								PEAK	PEAK				hurricane
CHARLOTTE, NC								PEAK	PEAK				tornado/hurricane
MONTREAL													cold / snow
OTTAWA													cold / snow
QUEBEC													cold / snow
MONTERREY													heat

TORNADO
HURRICANE
COLD / SNOW
HEAT

Figure 5.7: Extrait des conditions météo

CHAPITRE 6 : MÉTHODES D'OPTIMISATION

Dans ce chapitre, on décrit la méthode "Recherche Tabou". En premier lieu, on décrit d'une façon globale l'algorithme général. Puis, en second lieu, on s'intéresse à l'implantation de cette méthode pour les quatres problèmes d'optimisation qui constituent le projet.

6.1 Tabou en général

6.1.1 Méta-heuristiques

Le mot méta-heuristique est dérivé de la composition de deux mots grecs :

- heuristique qui vient du verbe heuriskein (euriskein) et qui signifie 'trouver'.
- meta qui est un suffixe signifiant 'au-delà', 'dans un niveau supérieur'.

En absence d'algorithme produisant une solution optimale en un temps polynomial, les méta-heuristiques permettent de déterminer une solution de bonne qualité dans un laps de temps raisonnable. Les méta-heuristiques sont des techniques générales d'optimisation très populaires, et très efficaces.

Les deux types de méta-heuristiques les plus populaires sont la "Recherche Locale" et les "Méthodes Évolutives". Le Recuit Simulé [Kirkpatrick et al., 1983] et la Recherche Tabou [Glover, 1986] font partie de la "Recherche Locale" et les algorithmes génétiques [Holland, 1975] sont dites des "Méthodes Évolutives". Voir [Hertz, 2005] pour plus de détails.

Les méthodes de Recherche Locale partent d'une configuration initiale et appliquent successivement des transformations à la solution courante tant qu'un critère d'arrêt n'est pas vérifié. Leur mise en oeuvre nécessite le choix d'une ou plusieurs solutions initiales et d'une ou plusieurs transformations locales. On parle aussi de mouvement plutôt que de transformation.

Les algorithmes génétiques (http://www.genetic-programming.org), devenus populaires au début des années 90 [Hertz et Kobler, 2000] même si leur origine remonte à 1975 [Holland, 1975], forment une famille très intéressante d'algorithmes d'optimisation. Leur fonctionnement est calqué sur les critères de sélection naturelle. Partant d'une population initiale constituée de solutions admissibles, on produit itérativement plusieurs générations (contrairement à la "Recherche Locale" qui travaille sur une solution). À chaque étape, afin de garder une population de taille raisonnable, on ne conserve que les meilleurs individus (solutions).

Un mouvement,dans le cas d'une "Recherche Locale", permet de passer d'une solution valide à une autre. On dit que la nouvelle solution est un voisin de la précédente. L'ensemble des solutions que l'on peut atteindre à partir d'une solution s'appelle le voisinage de la solution.

Soit S un ensemble et soit f une fonction qui associe une valeur $f(x)$ à chaque élément $x \in S$. L'objectif est de déterminer un élément dans S qui minimise la fonction f : déterminer $x^* \in S$ tel que $f(x^*) = \min_{x \in S} f(x)$.

Dans la suite de ce chapitre, chaque élément de S est appelé solution, $V(x)$ est le voisinage de x et la fonction objectif est désignée par f. $V(x)$ contient des solutions

Algorithme 6.1 Algorithme Recherche locale

1. Générer une solution initiale x et poser $x^* = x$.
2. Tant qu'aucun critère d'arrêt n'est satisfait faire :
   - Générer une solution x' dans le voisinage $V(x)$ de x.
   - Poser $x = x'$ et mettre à jour x^* si $f(x) < f(x^*)$.

obtenues à partir de x en effectuant des petites modifications. Chaque solution dans $V(x)$ est dite voisine de x. La meilleure solution rencontrée est notée x^*.

La méthode de "Recherche Locale" la plus simple est probablement la méthode de descente : elle consiste à se déplacer dans l'espace de recherche en choisissant toujours la meilleure solution dans le voisinage de la solution courante. On a $f(x') = \min_{x'' \in V(x)} f(x'')$ à chaque itération. L'algorithme s'arrête dès qu'il n'y a pas d'amélioration de la fonction f entre deux itérations successives (c'est-à-dire dès que la solution voisine x' n'est pas meilleure que la solution courante x. Le principal défaut de la méthode de descente est son arrêt au premier minimum local rencontré.

L'existence de minima locaux (fig 6.1), impose l'utilisation de méthodes d'exploration efficaces pour éviter de rester bloqué aux alentours de ces minima. Plusieurs méthodes ont été proposées et ont souvent été inspirées par des phénomènes naturels:

- le Recuit Simulé, qui est basé sur les principes d'équilibre énergétique lors de la cristallisation des métaux, choisit x' au hasard dans $V(x)$. Cette solution voisine à x est acceptée comme nouvelle solution courante si elle est meilleure que x. Dans le cas contraire, x' n'est acceptée comme nouvelle solution courante qu'avec une certaine probabilité. Si x' est refusée, une nouvelle solution est tirée au hasard dans $V(x)$, et ainsi de suite. Le processus s'arrête lorsque la solution x n'a plus été modifiée depuis un certain temps.

- la méthode Recherche Tabou introduit la notion d'histoire (mémoire) dans la stratégie d'exploration des solutions.

- les algorithmes génétiques font référence à la sélection, la mutation et le croisement des individus au sein d'une même espèce biologique.

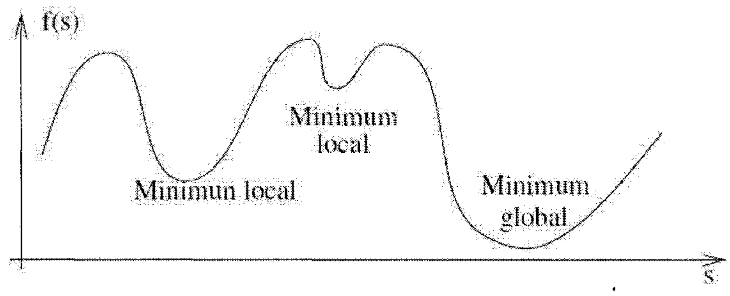


Figure 6.1: Fonction avec plusieurs minima locaux

Dans ce qui suit, on détaille la méthode Recherche Tabou.

6.1.2 Recherche Tabou

Cette méthode a été présentée pour la première fois par Glover en 1986 [Glover, 1986]. L'idée de base consiste à introduire la notion d'histoire dans la politique d'exploration des solutions. Le nom "Recherche Tabou" donné en 1986 par Glover exprime l'interdiction de revenir vers des solutions récemment visitées.

La Recherche Tabou est similaire à la méthode de descente, en ce sens que la solution x' choisie dans $V(x)$ est la meilleure possible. Cependant, l'algorithme ne s'arrête pas si $f(x') \geq f(x)$, le principe sous-jacent étant qu'il se peut que l'on doive détériorer la solution courante pour pouvoir atteindre un optimum global. Ce fait est illustré dans la figure 6.2 [Hertz 2005].

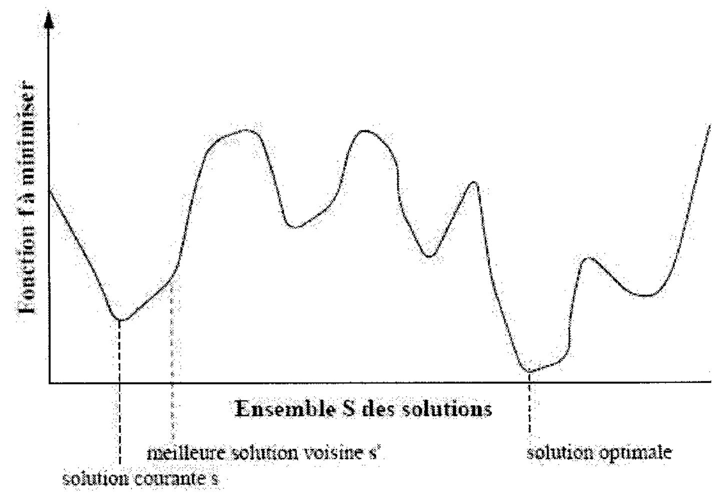


Figure 6.2: Détérioration de la solution courante

Lorsque la meilleure solution $x' \in V(x)$ est telle que $f(x') > f(x)$, il est possible que x soit la meilleure solution dans $V(x')$, et l'algorithme risque alors de boucler autour des solutions x et x'. Pour contourner cette difficulté, la Recherche Tabou considère une liste de solutions dites "taboues" (il est interdit de se rendre vers une solution faisant partie de cette liste) pendant un certain nombre d'itérations. Ainsi, lorsque la Recherche Tabou se déplace d'une solution x vers une solution voisine x', la solution x est introduite dans la liste tabou, empêchant le retour immédiat vers x.

A chaque itération, tous les mouvements possibles sont examinés et le "meilleur", ou plus exactement le moins mauvais est sélectionné. Comme cette manière d'agir peut cycler c'est-à-dire répéter indéfiniment la même suite de mouvements, les t derniers mouvements effectués sont considérés comme interdits ("tabous"), t représentant la taille de la liste taboue qu'on note T. Le mouvement effectivement choisi à chaque itération est donc le meilleur mouvement non tabou.

On désigne par $V^T(x)$=$\{x' \in V(x)$ tel que x' n'est pas tabou$\}$ l'ensemble des solutions voisines de x qui ne sont pas taboues.

Algorithme 6.2 Algorithme Recherche Tabou

1. Générer une solution initiale x, poser $x^* := x$ et $T := \emptyset$.
2. Tant qu'aucun critère d'arrêt n'est satisfait faire :
   - Déterminer la solution x' qui minimise $f(x')$ dans $V^T(x)$.
   - Si $f(x') < f(x^*)$ alors $x^* := x'$.
   - Poser $x := x'$ et mettre à jour T.

Diverses améliorations sont possibles et ont été proposées :

1. Stratégie d'intensification : on mémorise les meilleures solutions rencontrées et on essaie d'en dégager quelques propriétés communes pour définir des régions intéressantes vers lesquelles on oriente la recherche (par exemple en rendant tabou tous les mouvements qui font sortir de cette région).
2. Stratégie de diversification : c'est le contraire. L'application de cette politique conduit à mémoriser les solutions les plus fréquemment visitées et imposer un système de pénalité, afin de favoriser les mouvements les moins souvent utilisés.
3. Aspiration : il arrive qu'un mouvement tabou, donc en principe interdit, se révèle intéressant. Le critère d'aspiration le plus fréquemment utilisé et le plus simple, consiste à regarder si le mouvement considéré ne conduit pas à une solution de coût inférieur à celui de la meilleure solution rencontrée jusqu'à présent.

4. Taille de la liste taboue : la taille T de la liste taboue est à déterminer empiriquement. Elle varie avec les problèmes, mais c'est un paramètre important. En effet, une liste trop petite peut conduire à un cycle alors qu'une liste trop grande peut interdire des transformations intéressantes (On trouve des règles statiques et des règles dynamiques).
5. Selection du meilleur voisin : la politique du First Fit dans laquelle on sélectionne le premier voisin non tabou est souvent utilisée lorsque la taille du voisinage ne permet pas d'effectuer une évaluation complète, dans le cas contraire la politique du Best Fit qui sélectionne le meilleur voisin est utilisée.
6. Critères d'arrêt : le critère d'arrêt sert à déterminer le moment où l'on considère que la solution trouvée est d'assez bonne qualité pour être acceptable.

6.2 Recherche Tabou pour les problèmes d'optimisation

Dans cette partie, on va décrire les éléments clés de la résolution des problèmes mathématiques conçus au chapitre 3. On s'intéressera à chacun des quatres problèmes.

En commun à tout les problèmes, la génération d'une solution initiale est réalisée d'une façon interactive grâce à l'interface conviviale de l'application. Ainsi, la solution initiale est réalisable (vérifie toutes les contraintes stratégiques). De ce fait, la description de la solution initiale est traitée au chapitre suivant à la section 7.2.1. On se contente dans ce chapitre d'indiquer la solution initiale comme étant une donnée.

Outre les contraintes stratégiques et de simulation, pour besoin de simulation, quatre états associés aux villes sont distingués :

- aucune modification n'est permise : on dit que le ville est inactive.
- on peut changer uniquement les dates de début et de fin des présentations d'une ville : on dit que la ville est semi active.
- on peut changer les dates de début et de fin des présentations d'une ville ainsi que leurs durées : on parle dans ce cas de ville active.
- on ne peut pas supprimer une ville. On exige, ainsi, qu'une ville fasse partie d'une tournée : on parle de ville exigée. Cet état est utilisé avec le paramètre nombre de villes. Toute ville exigée est active. Si on veut qu'une ville fasse partie d'une tournée sans aucune modification, il suffit de déclarer cette ville inactive.

Ces états sont respectés par les quatre algorithmes. Ainsi, avant de procéder à un changement, voire même un test, l'état de la ville liée à la présentation est vérifié. À titre d'exemple, lors de l'optimisation de la durée, si une ville n'est pas active, aucun changement (mouvement impliquant cette ville) n'est effectué. Ceci est commun pour tous les problèmes.

Le critère d'arrêt choisi pour l'ensemble des problèmes est le nombre d'itérations. Une autre propriété commune à tous les problèmes, est la liste taboue.

On a défini deux valeurs $MinL$ et $MaxL$. La première valeur a pour objectif de garder tabou un élément nouvellement inséré pour au moins $MinL$ itérations. La deuxième valeur définit la longueur de la liste taboue et donc le maximum d'itérations pendant lesquelles un élément de la liste taboue peut rester tabou. En plus, à chaque élément qui vient d'être inséré dans la liste taboue, on associe un nombre $L = R + MinL + it$ où R est un nombre entier aléatoire choisi dans l'intervalle $[0, MaxL - MinL]$ et it est le numéro de l'itération actuelle. L'élément qui vient d'être inséré sera tabou jusqu'à l'itération L.

6.2.1 Recherche Tabou pour la durée

Partant d'une solution initiale, la Recherche Tabou pour la *durée* consiste à modifier les durées des présentations afin de maximiser le profit. Des échanges d'ajout et de suppression de semaines à la solution courante sont effectuées. Chaque spectacle (tournée) est traité indépendamment des autres spectacles. La solution optimale est déduite à la fin de ce processus.

Contraintes de simulation

En plus des contraintes stratégiques et des contraintes générales de simulation, une autre contrainte liée au paramètre *durée* est créée. Cette contrainte consiste en un nombre maximum de semaine, noté $K\_semaines$, qu'on peut ajouter ou enlever d'une présentation par rapport à la solution initiale utilisée pour simulation (fig 6.3). Ainsi, si une valeur 2 est affectée à $K\_semaines$, les durées possibles pour une présentation de durée initiale d_0 sont $(d_0 + 2, d_0 + 1, d_0, d_0 - 1, d_0 - 2)$ semaines (le + désigne des ajouts de semaines et le - désigne la suppression de semaines). Ceci bien sûr n'est possible que si la ville est active c'est-à-dire si la modification de la de durée est autorisée.

Le Voisinage

Soit x une solution réalisable (planification). Le voisinage de cette solution contient toutes les planifications réalisables (vérifiant toutes les contraintes) issues des ajouts et des suppressions d'une semaine. Plus précisément, un mouvement est une permutation qui ajoute une semaine à une présentation et enlève une autre semaine d'une autre présentation d'un même spectacle. Ainsi, si $Durée_i^{(k,q)}$ est la durée de

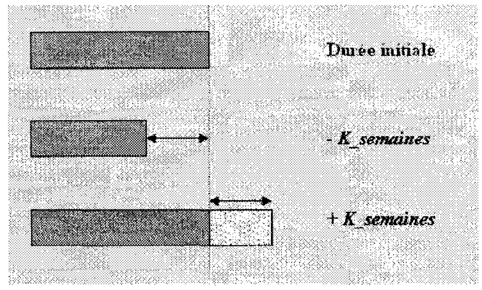


Figure 6.3: Modification d'au plus *K_semaines*

la q^{ieme} présentation du spectacle k dans la ville i et $Durée_j^{(k,q')}$ est la durée de la q'^{ieme} présentation du spectacle k dans la ville j (on parle du même spectacle k pour les deux présentations), une permutation $(i^{(k,q)}, j^{(k,q')})$, (qu'on note (i,j) pour simplification de l'écriture) donnera des nouvelles durées $(Durée_i^{(k,q)})' = Durée_i^{(k,q)} + 1$ *et* $(Durée_j^{(k,q')})' = Durée_j^{(k,q')} - 1$. Ce mouvement n'est autorisé que lorsqu'on a $(Durée_j^{(k,q')})' \geq Durée_{min}$. La solution issue de ce mouvement n'est insérée dans le voisinage de la solution courante que lorsque toutes les contraintes sont vérifiées. Il faut entre autre vérifier que les contraintes d'intervalle de temps sont toujours respectées car une permutation (i,j) induit une variation d'une semaine pour toutes les villes dont les dates sont programmées entre les présentations $P_i^{(k,q)}$ et $P_j^{(k,q')}$. En plus, la date de fin de $P_i^{(k,q)}$ et la date début de $P_j^{(k,q')}$ sont décalées de $+1$ semaine.

Un indice, indiquant le changement par rapport à la solution initiale, évite d'effectuer plus que $K\_semaines$ de changements. Ainsi, pour la permutation (i,j) si $d_i' - d_i^0 > K\_semaines$ où d_i^0 est la durée de la solution initiale, ce mouvement est rejetée. De même si $d_j^0 - d_j' > K\_semaines$.

Le voisinage contient uniquement les solutions réalisables. On n'effectue pas de mouvement de type (i,i).

La figure 6.4 illustre un mouvement pour le paramètre *durée*. Partant d'une solution

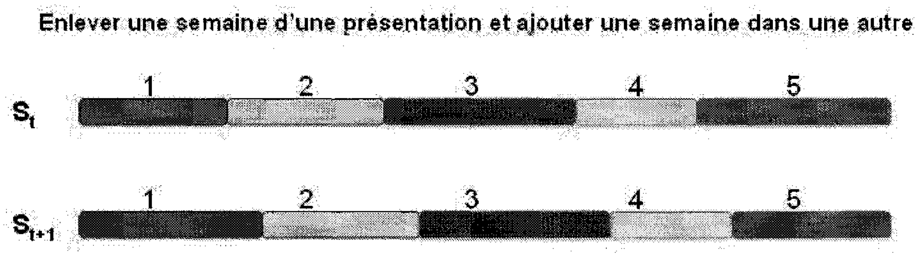


Figure 6.4: Permutation d'une semaine

actuelle S_t, la permutation (1,5) des deux présentations 1 et 5 nous permet d'avoir la solution S_{t+1}. On ajoute une semaine à 1 et on enlève une semaine de 5. La date de début de 1 et la date fin de 5 ne changent pas. Les dates de début et les dates de fin de 2, 3, 4 ainsi que la date fin de 1 et la date début de 5 sont décalées d'une semaine.

La liste taboue

La paire (j, i) est introduite dans la liste taboue lorsqu'un mouvement (i, j) est effectué. Tel qu'indiqué précédemment, pour éviter de cycler, on a choisi d'associer une valeur R aléatoire à chaque paire nouvellement insérée dans la liste taboue. La paire nouvellement insérée reste taboue pendant $R + MinL$ itérations.

6.2.2 Recherche Tabou pour la distance

Partant d'une solution initiale, la Recherche Tabou pour la *distance* consiste à modifier l'itinéraire des spectacles afin de minimiser le coût de transport. Chaque spectacle (tournée) est traité indépendamment des autres spectacles. Des permutations des ordres de succession entre les villes sont effectuées, la solution optimale est déduite à la fin de ce processus.

Contraintes de simulation

En plus des contraintes stratégiques et des contraintes générales de simulation, une autre contrainte liée au paramètre distance est créée. Cette contrainte considère une valeur maximale de déplacement, notée *Max_déplacement* Cette valeur indique que la date d'une présentation ne peut pas être décalée de sa date de programmation initiale de plus de *Max_déplacement* semaines. Ainsi, si une valeur 52 est affectée à *Max_déplacement*, les dates possibles pour une présentation seraient n'importe lesquelles dans l'intervalle allant d'une année de moins que sa date initiale jusqu'à une année de plus. (les dates sont par rapport à la date de début des présentations).

Le Voisinage

Soit x une solution réalisable (planification). Le voisinage de cette solution contient toutes les planifications réalisables (vérifiant toutes les contraintes) issues des permutations de deux villes consécutives dans un spectacle.

Un mouvement est donc une permutation (i, j) qui change l'ordre de deux villes consécutives dans la séquence de l'itinéraire d'un même spectacle. Cette permutation permet en premier lieu d'affecter la date de début de i à j et la date de fin de j à la date de fin de i on a ainsi :

$(Début_j^{(k,q')})' = Début_i^{(k,q)}$ et $(Fin_i^{(k,q)})' = Fin_j^{(k,q')}$.

Étant donné que $(Fin_i^{(k,q)} - Début_i^{(k,q)}) \geq Durée_i^{(k,q)})$ et que l'égalité est rarement retrouvée pour toutes les présentations (de même pour j), on a gardé cette propriété d'inégalité (si elle a lieu). Plus précisément, soient $Ec_i = Fin_i^{(k,q)} - Début_i^{(k,q)} - Durée_i^{(k,q)}$ et $Ec_j = Fin_j^{(k,q')} - Début_j^{(k,q')} - Durée_j^{(k,q')}$. On a $Ec_i \geq 0$ et $Ec_j \geq 0$ par la contrainte (3.2) d'intégrité des données. En effectuant une permutation (i,j), nous posons :

- $$\begin{aligned} (Fin_j^{(k,q')})' &= (Début_j^{(k,q')})' + Durée_j^{(k,q')} + Ec_j \\ &= Début_i^{(k,q)} + Fin_j^{(k,q')} - Début_j^{(k,q')} \end{aligned}$$

- $$\begin{aligned} (Début_i^{(k,q)})' &= (Fin_i^{(k,q)})' - Durée_i^{(k,q)} - Ec_i \\ &= Fin_j^{(k,q')} - Fin_i^{(k,q)} + Début_i^{(k,q)} \end{aligned}$$

Un mouvement (i,j) est accepté si les contraintes de réalisabilité (éventuellement les contraintes de fenêtre de temps) sont vérifiées; et par la suite la nouvelle solution est insérée dans le voisinage de la solution courante.

L'écart entre la date de début initiale d'une présentation dans la planification initiale et la date de début de la même présentation dans la solution courante est calculé à chaque mouvement possible. Si cet écart dépasse *Max_déplacement* le mouvement est rejeté. Le voisinage contient uniquement les solutions réalisables.

La permutation (i,j) est identique à la permutation (j,i). Le voisinage alors contiendra des solutions en double si on n'interdit pas un de ces deux mouvements. Pour éviter la duplication des solutions, on a ajouté la contrainte $i > j$. Les mouvements (i,i) ne sont pas autorisés.

La figure (fig 6.5) illustre un mouvement pour le paramètre *distance*. Partant d'une solution actuelle S_t, la permutation (i,j) des deux présentations consécutives i et j nous permet d'avoir la solution S_{t+1}. Ainsi aucun changement n'est effectué pour les autres présentations, tandis que pour i et j la date de début de j dans S_{t+1} devient 1 (= date de début de i dans S_t) et la date de fin de i dans S_{t+1} devient 12 (= date de fin de j dans S_t). De plus, la date de fin de j dans S_{t+1} devient 6 (= 1+12-7) et la date de début de i dans S_{t+1} devient 9 (= 12-4+1).

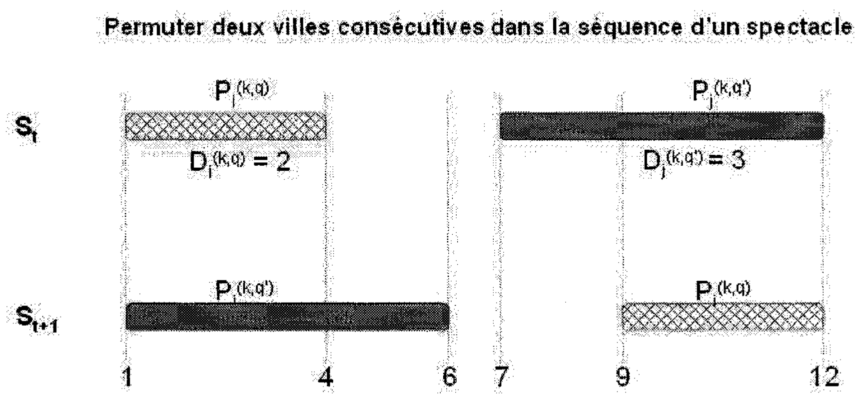


Figure 6.5: Permutation de deux villes consécutives

La liste taboue

L'objectif de la liste taboue est d'interdire de cycler, et entre autre de revenir à la solution précédente, c'est-à-dire d'interdire les mouvements équivalents (i, j) et (j, i). Étant donné que la permutation (j, i) n'est pas un mouvement autorisé suite à la contrainte $i > j$, la liste taboue contient alors les pairs (i, j) après un mouvement (i, j) accepté.

Le mouvement (i, j) reste tabou pendant $R + MinL$ itérations.

6.2.3 Tabou pour l'espacement

Contraintes de simulation

En plus des contraintes stratégiques et des contraintes générales de simulation, une autre contrainte liée au paramètre espacement est créée. Cette contrainte concerne *Max_déplacement* et est identique à celle du paramètre distance.

Le Voisinage

Soit x une solution réalisable (planification). Le voisinage de cette solution contient toutes les planifications réalisables (vérifiant toutes les contraintes) issues des permutations de deux dates de début des présentations.

Un mouvement est donc une permutation qui permute deux présentations $P_i^{(k,q)}\, et\, P_j^{(k,q')}$ d'un même spectacle k. On note $(P_i^{(k,q)}, P_j^{(k,q')})$ un tel mouvement qui se traduit comme suit (même chose que la *distance* pour les changements des dates) :

- $(Début_j^{(k,q)})' = Début_i^{(k,q')}$ et $(Début_i^{(k,q)})' = Fin_j^{(k,q')} - Fin_i^{(k,q)} + Début_i^{(k,q)}$ pour les dates de début.
- $(Fin_i^{(k,q)})' = Fin_j^{(k,q')}$ et $(Fin_j^{(k,q')})' = Début_i^{(k,q)} + Fin_j^{(k,q')} - Début_j^{(k,q')}$ pour les dates de fin.

En plus pour $P_h^{(k,q")}$ programmée entre $P_i^{k,q)}$ et $P_j^{(k,q')}$ c'est-à-dire $Fin_i^{(k,q)} < Début_h^{(k,q")} < Fin_h^{(k,q")} < Début_j^{(k,q')}$ on a :

- $(Début_h^{(k,q")})' = Début_h^{(k,q")} + (Fin_j^{(k,q')})' - Fin_i^{(k,q)}$ pour les dates de début.
- $(Fin_h^{(k,q")})' = (Début_h^{(k,q")})' + Fin_h^{(k,q")} - Début_h^{(k,q")}$ pour les dates de fin.

Ce mouvement est accepté si les contraintes de réalisabilité (fenêtres de temps) et les contraintes d'espacement sont vérifiées; et par la suite la nouvelle solution est insérée dans le voisinage de la solution courante.

De même que le paramètre *distance*, l'écart entre la date de début d'une présentation dans une ville dans la solution initiale et celle dans la nouvelle solution est calculé. Si cet écart dépasse *Max_déplacement* le mouvement est rejeté.

La permutation $(P_i^{(k,q)}, P_j^{(k,q')})$ est symétrique. On fait recours au même principe que le paramètre distance pour éviter la duplication des solutions, et ce en ajoutant la contrainte $i > j$.

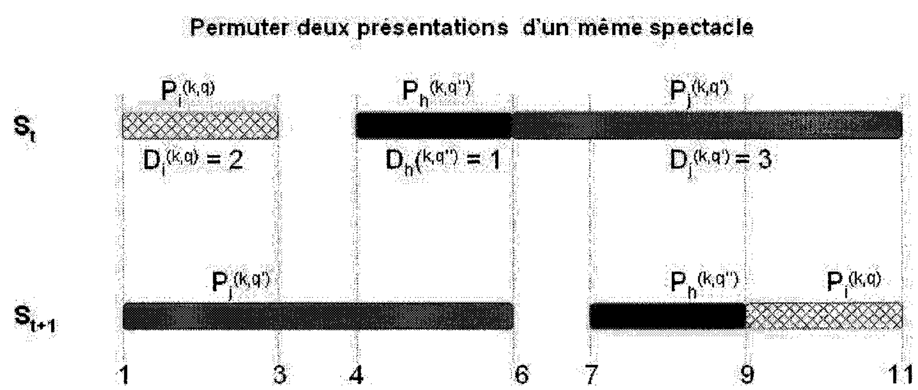


Figure 6.6: Permutation de deux présentations d'un même spectacle

La figure (fig 6.6) illustre un mouvement pour le paramètre *espacement*. Partant d'une solution actuelle S_t, la permutation (i, j) des deux présentations i et j du même spectacle k, nous permet d'avoir la solution S_{t+1}. Seules les dates de début et les dates de fin de i, j et h subissent des changements. Ainsi, la date de début de j dans S_{t+1} devient 1 (= date de début de i dans S_t) et la date de fin de i dans S_{t+1} devient 11 (= date de fin de j dans S_t). De plus, la date de fin de j dans S_{t+1} devient 6 (= 1+11-6) et la date de début de i dans S_{t+1} devient 9 (= 11-3+1). Pour h dans S_{t+1}, la date de début devient 7 (= 4+6-3) et la date de fin devient 9 (= 7+6-4).

La liste taboue

La liste taboue contient les deux éléments $P_i^{(k,q)}\ et\ P_j^{(k,q')}$ une fois qu'un mouvement $(P_i^{(k,q)}, P_j^{(k,q')})$ est validé comme meilleur choix. On rend tabou tout mouvement impliquant au moins l'une des deux présentations. Ainsi, $(P_i^{(k,q)}, *^k)$, $(*^k, P_i^{(k,q)})$, $(P_j^{(k,q')}, *^k)\ et\ (*^k, P_j^{(k,q')})$ sont des mouvements interdits où $*^k$ est utilisé pour désigner toute présentation faisant partie d'un spectacle k.

En commun à tous les problèmes, les éléments insérés restent tabou pendant $R + MinL$ itérations.

6.3 Nombre de villes

L'objectif du paramètre *nombre de villes* est d'intégrer le choix d'un sous-ensemble de villes à visiter parmi une liste donnée de villes potentielles.

V_{min}^k, le nombre de villes qu'on veut visiter à tout prix pour un spectacle k, est une donnée déterminée par les contraintes de cardinalité.

Nous avons développé deux algorithmes pour permettre le choix d'un sous-ensemble de villes. Le premier algorithme fonctionne de manière totalement automatique et donne le meilleur sous-ensemble de l^k villes à visiter, pour chaque nombre l^k compris entre V_{min}^k et V_{max}^k (algorithme 6.3), et le deuxième algorithme fonctionne en mode semi-automatique. Il commence par fournir la meilleure solution avec V_{max}^k villes et classe les villes selon les revenus générés. L'utilisateur a ensuite la possibilité de choisir une ville à ôter, ou il peut laisser le choix à l'ordinateur. Ce processus est répété jusqu'à obtenir un ensemble de V_{min}^k villes (algorithme 6.7).

Partant d'une solution initiale contenant un nombre maximal de villes soit V_{max}^k pour chaque spectacle k, on essaie de trouver une meilleure solution avec moins de villes, si c'est possible. Ainsi, pour chaque spectacle k et pour chaque nombre de villes l^k variant entre la borne min V_{min}^k déterminée par les contraintes de cardinalité et la borne max V_{max}^k déterminée par la solution initiale, on essaie de trouver la meilleure solution à l'aide de l'algorithme "Meilleure solution" (algorithme 6.4) dans le mode automatique (algorithme 6.3) ou en respectant les choix de l'utilisateur (algorithme 6.7) dans le mode interactif. Des comparaisons entre les meilleurs solutions trouvées pour chaque l^k sont effectuées, la solution optimale est la meilleure solution rencontrée tout au long de ce processus (pour les deux algorithmes).

Dans l'algorithme "Meilleure solution" (algorithme 6.4), on enlève une ville à chaque itération de la solution courante. Puis on réajuste les durées en ajoutant la durée de la présentation enlevée, dite *durée gagnée*, à d'autres villes. Ce réajustement (algorithme 6.5) respecte toutes les contraintes stratégiques. Ainsi, pour avoir une solution réalisable, il se peut qu'on ne puisse pas ajouter toute la durée de la présentation enlevée à d'autres présentations, on se contente alors d'ajouter le maximum de semaines ($\leq$ durée de la présentation enlevée) qu'on peut. En effet, pour respecter les fenêtres de temps, le *K_semaines* ainsi que *Max_déplacement*, plusieurs présentations peuvent ne pas accepter des ajouts de semaines.

Une fois le réajustement effectué, on ré-optimise la nouvelle planification en se basant sur l'algorithme "optimiser" (algorithme 6.6) qui consiste en une séquence d'optimisations se basant sur le paramètre durée en premier, puis l'espacement en second lieu et enfin le paramètre distance. Cette séquence peut être modifiée en mode semi automatique, il suffit d'appliquer les critères désirés.

Pour l'algorithme 6.7, l'utilisateur décide quelle ville sera enlevée. Des propositions dont la solution issue de l'algorithme Meilleur solution sont fournies par l'outil. La validation de ce choix est décrite dans l'algorithme 6.7 par "enlever la ville i choisie".

A noter qu'une ville ne peut être supprimée que si son état indique que c'est une ville qu'on peut supprimer, c'est-à-dire que la ville est active, semi active ou inactive.

6.3.1 Algorithmes

Algorithme 6.3 Algorithme Nombre de villes

1. Partir de x une solution initiale, poser $l^k := V^k_{max}$
2. Optimiser(x), poser $x^* := x$
3. Pour chaque spectacle k faire
   - Tant que $l^k \geq V^k_{min}$:
     (a) poser $x' =$ Meilleure solution(x).
     (b) Si $f(x') > f(x^*)$ alors $x^* := x'$.
     (c) Poser $x := x'$.
     (d) $l^k := l^k - 1$.
4. retourner(x^*)

Algorithme 6.4 Algorithme Meilleure solution

1. poser $x^* := x$
2. Pour i=1 à l^k :
   - poser $x' := x$
   - Enlever la ville i de x' pour obtenir S_{l^k}, poser dg la *durée gagnée.*
   - Réajuster(S_{l^k}, dg).
   - Optimiser(S_{l^k}).
   - Si $f(S_{l^k}) > f(x^*)$ alors $x^* := S_{l^k}$.
3. retourner(x^*)

Algorithme 6.5 Algorithme Réajuster

1. poser $s := S_{l^k}$, $r := 1$
2. Pour j=1 à dg :
   - Tant que ($r \leq l^k$) :
     (a) ajouter une semaine à la présentation de la ville r dans la planification s pour obtenir s'.
     (b) Si s' vérifie toute les contraintes poser $s := s'$
     (c) Sinon r: r + 1
3. retourner(s)

Algorithme 6.6 Algorithme Optimiser

1. poser $x^* := x$
2. Optimiser *Durée* de x^*,
3. Optimiser *Espacement* de x^*,
4. Optimiser *Distance* de x^*
5. retourner(x^*)

Algorithme 6.7 Algorithme Nombre de villes semi-automatique

1. Partir de x une solution initiale, poser $l^k := V^k_{max}$
2. Optimiser(x), poser $x^* := x$
3. Pour chaque spectacle k faire
   - Tant que $l^k \geq V^k_{min}$:
     (a) Enlever la ville i choisie de x pour obtenir S_{l^k}, poser dg la *durée gagnée.*
     (b) Réajuster(S_{l^k}, dg).
     (c) Optimiser(S_{l^k}).
     (d) Si $f(S_{l^k}) > f(x^*)$ alors $x^* := S_{l^k}$.
     (e) Poser $x := S_{l^k}$.
     (f) $l^k := l^k - 1$.
4. retourner(x^*)

CHAPITRE 7 : RÉSULTATS

Le critère primordial dans cette réalisation est la satisfaction du client. Cet outil proposé répond aux attentes du Cirque du Soleil, sa force étant dans sa simplicité et son interactivité.

L'interface conviviale, l'édition des résultats selon les besoins des décideurs du Cirque du Soleil, et la rapidité de la génération des alternatives (temps d'exécution) font de ce travail réalisé un outil répondant aux besoins. Dans ce chapitre, on survole ce système d'aide à la décision en décrivant les possibilités qu'il offre.

7.1 Éléments de SIAD

Avant de détailler les différentes composantes du SIAD, on développe la façon avec laquelle la génération de la solution initiale s'effectue.

7.1.1 Solution initiale

Du fait que la solution proposée (planification initiale) reflète plus des choix stratégiques (qualitatifs) que des équations quantitatives, l'automatisation de cette tâche n'a pas de sens. Ce fait est reflété par les états des villes dans une planification. On a des villes où aucune modification n'est permise (ville inactive : date et durée fixées), d'autres pour lesquelles on peut uniquement changer la date des présentations (ville semi active) et puis les villes actives pour lesquelles la date et la durée peuvent être modifiées. En plus, il y a des villes dont on exige leurs présence dans une tournée.

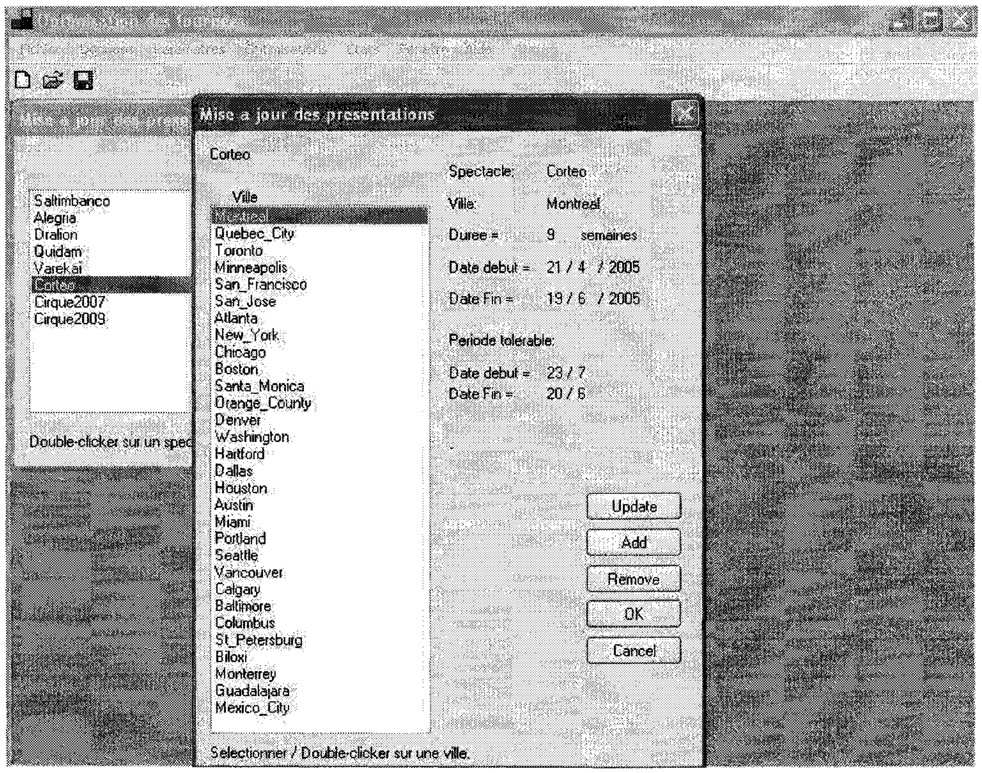


Figure 7.1: Mise à jour d'une planification.

Le SIAD, toutefois, permet de créer une solution initiale rapidement en interactivité avec le planificateur. Ainsi, selon ses choix, le SIAD alerte l'utilisateur si un conflit de réalisabilité est détecté. Le contrôle de fenêtres du temps, de l'espacement minimum et des durées est effectué automatiquement (fig 7.1).

7.1.2 IHM

Par l'intermédiaire de l'interface, le décideur accède aux données et aux fonctions d'optimisation, et le système utilise le même vecteur pour lui communiquer les résultats des manipulations effectuées par le décideur. L'IHM permet aussi au planificateur de contrôler la recherche de la solution satisfaisante en lui permettant de paramètrer ses choix de planification (fig 7.2), et de tester les différents scénarios.

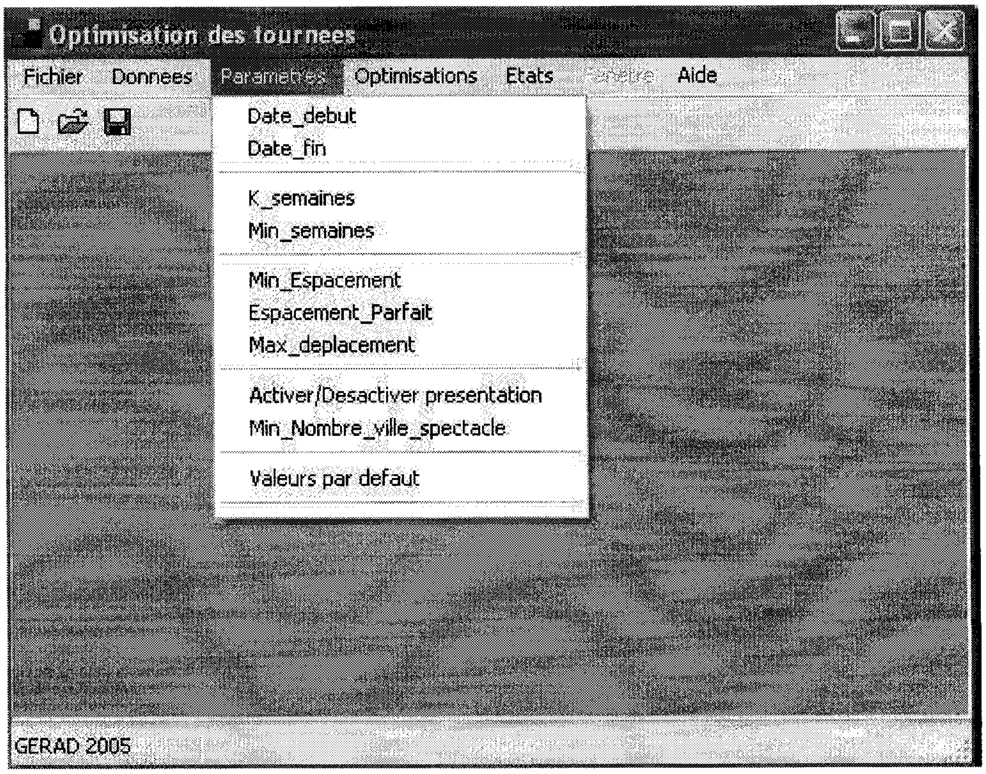


Figure 7.2: Parametrages.

7.1.3 Optimiseur

Le rôle principal de ce module (fig 7.3) est de réaliser les calculs standards c'est-à-dire notamment vérifier si les contraintes sont respectées, et améliorer la solution suggérée par le planificateur. Si la solution calculée ne satisfait pas le planificateur, il peut toujours modifier les paramètres, et / ou les données d'entrées.

L'optimiseur (noyau) contient l'ensemble des procédures de calcul utilisées dans les différents traitements des données mis à disposition de l'utilisateur. Un séquencement autre que celui qui est proposé dans l'algorithme 6.6 (commande Tournees dans ce menu) est toujours possible, il suffit d'exécuter les paramètres désirés selon la séquence voulue. De plus, une méthode interactive de résolution est possible pour le paramètre nombre de villes permettant de valider quelle ville à enlever.

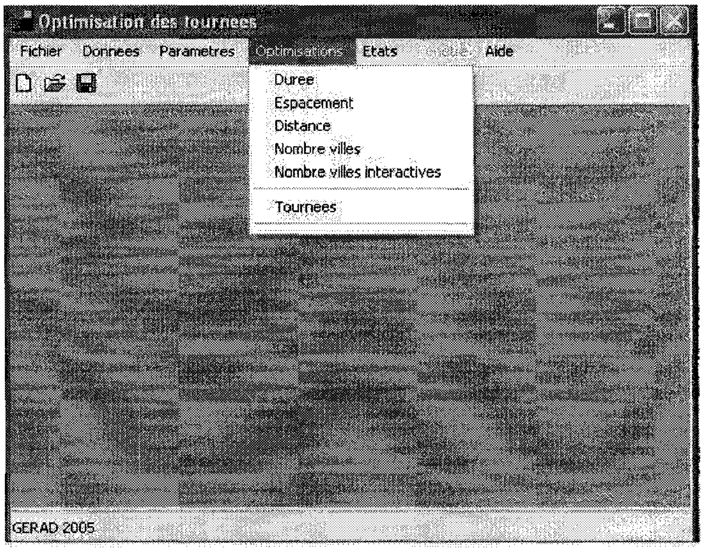


Figure 7.3: Exécution d'une optimisation.

7.1.4 SGBD

Le SGBD assure la fonction de mémoire ; il stocke non seulement les données, de façon permanente ou passagère, mais il gère aussi l'enregistrement de données volatiles ainsi que l'effacement de ces mêmes données selon le souhait de l'utilisateur. Ces données volatiles correspondent aux résultats obtenus au cours de traitements de données (des simulations).

Il est nécessaire que tout changement enregistré dans la base de données soit immédiatement répercuté sur les simulations. Le lien entre ces deux modules est donc dynamique. Le planificateur peut à tout moment remettre à jour les données (fig 7.4).

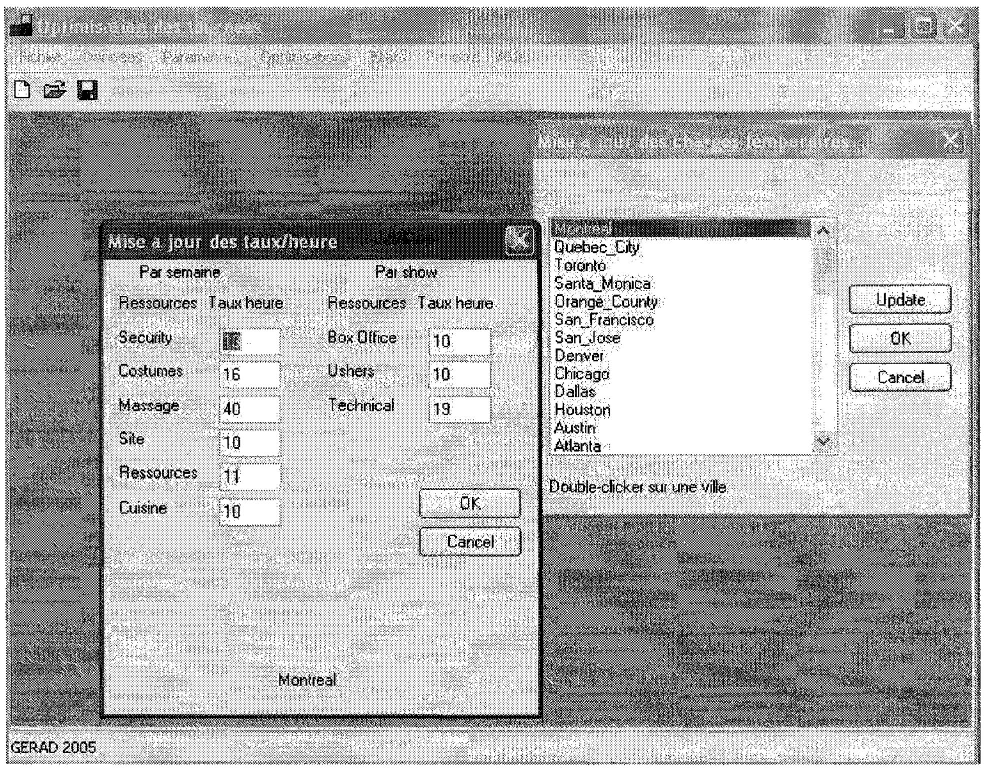


Figure 7.4: Mise à jour des données.

7.2 Résultats

Suite à la demande du Cirque du Soleil et en raison de la confidentialité des données, les résultats fournis dans cette section seront limités à montrer les possibilités qu'offre l'outil et à montrer les pourcentages des gains générés pour chacun des paramètres traités sans exhiber leurs ordre de grandeur.

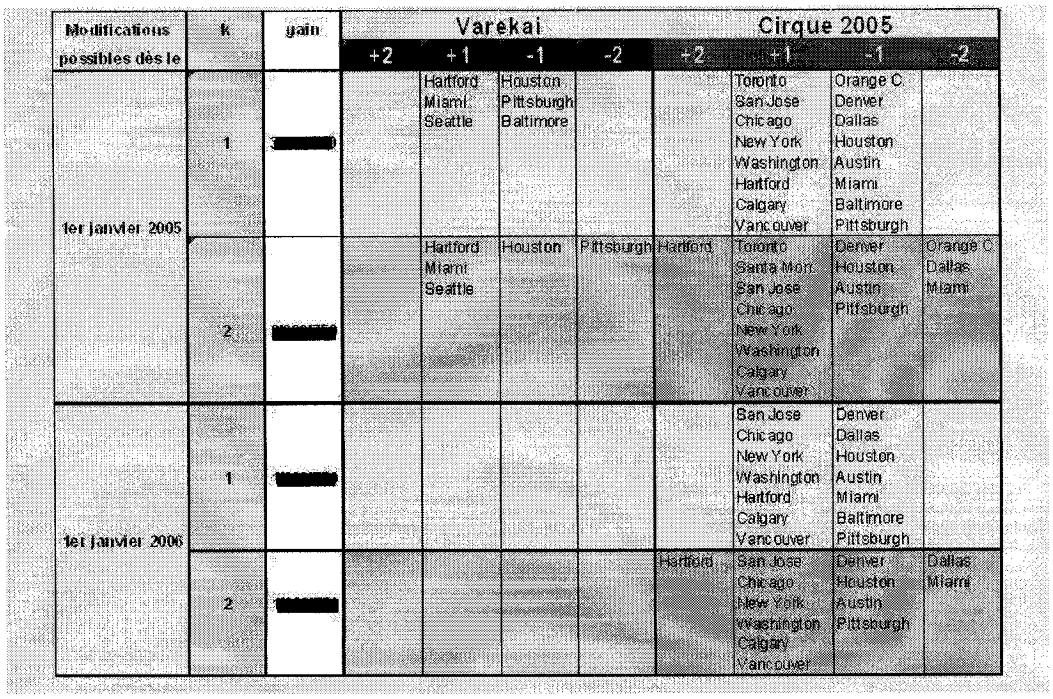
7.2.1 Tests

Dans cette section, on essaie de montrer le gain généré pour chacun des quatre paramètres traités dans ce projet. On s'intéressera en premier à la *durée*, puis à la *distance*, ensuite à l'*espacement*, et enfin au paramètre *nombre de villes.*

Durée

Le paramètre durée est l'élément le plus influent du profit. Différents tests ont été effectués pour bien maîtriser ce paramètre. Ces tests se penchent sur la variation des paramètres *K_semaines* et $Durée_{min}$. Le paramètre *K_semaines* définit le maximum de changement qu'on peut tolérer pour l'ajout et la suppression de semaines (Cf. fig 6.3) et le paramètre $Durée_{min}$ définit la borne inférieure des contraintes de durée (Cf. contrainte (3.6)).

La figure 7.5 montre un extrait de résultat pour la *durée.* Dans cette figure, on peut visualiser les présentations qui peuvent être modifiées pour améliorer le profit. À noter que le profit lié à ces modifications est supprimé pour confidentialité. Quatre variantes sont présentées dans cette figure. Elles concernent le paramètre *K_semaines* désigné par k et la date de début des simulations noté $Date_{début}$ et qui est désignée par "modifications possibles dès le". La $Date_{début}$ définit les contraintes de simulation (3.9). Les contraintes (3.10) qui sont définies par la date fin sont fixées pour cet exemple à $Date_{fin} = 1/1/2010$. Dans cet exemple, le paramètre $Durée_{min}$ est fixé à 4.



Modifications possibles dès le	k	gain	Varekai				Cirque 2005			
			+2	+1	-1	-2	+2	+1	-1	-2
1er janvier 2005	1	[redacted]		Hartford Miami Seattle	Houston Pittsburgh Baltimore			Toronto San Jose Chicago New York Washington Hartford Calgary Vancouver	Orange C Denver Dallas Houston Austin Miami Baltimore Pittsburgh	
	2	[redacted]		Hartford Miami Seattle	Houston	Pittsburgh	Hartford	Toronto Santa Mon. San Jose Chicago New York Washington Calgary Vancouver	Denver Houston Austin Pittsburgh	Orange C Dallas Miami
1er janvier 2006	1	[redacted]						San Jose Chicago New York Washington Hartford Calgary Vancouver	Denver Dallas Houston Austin Miami Baltimore Pittsburgh	
	2	[redacted]					Hartford	San Jose Chicago New York Washington Calgary Vancouver	Denver Houston Austin Pittsburgh	Dallas Miami

Figure 7.5: Extrait de résultat test pour la *durée*.

L'outil permet d'avoir plus d'améliorations sur une période de simulation longue. Ainsi les résultats où $Date_{début} = 1/1/2005$ sont meilleurs que ceux obtenus pour $Date_{début} = 1/1/2006$.

Le gain varie entre 1% et 2% pour la durée pour les différentes valeurs de *K_semaines*. Généralement, l'amélioration est plus nette pour des valeurs *K_semaines* = 2 et *K_semaines* = 3 que pour *K_semaines* = 1. À partir de *K_semaines* = 4 les améliorations sont minimes par rapport à celles générées par *K_semaines* = 3.

Pour changer la valeur de *K_semaines* affecté à 1 initialement, on peut soit la mettre à jour via IHM (fig 7.2) soit garder la valeur 1 et effectuer autant d'exécutions de la durée que la valeur désirée.

En combinant, *K_semaines* avec $Durée_{min}$, les gains peuvent atteindre 2.5% pour des planifications initiales ayant $Durée_{min} > 4$.

Distance

La *distance* est le paramètre qui trace l'itinéraire des tournées, l'objectif étant de minimiser le coût des charges de transport.

Le paramètre *Max_déplacement* qui indique que la date d'une présentation ne peut pas être décalée de sa date de programmation initiale de plus de *Max_déplacement* semaines, est utilisé pour dépister les améliorations.

La figure 7.6 montre une amélioration possible d'une planification en optimisant la *distance* pour *Max_déplacement* =13 semaines. Les distances sont illustrées et les coûts ne le sont pas. À noter que le gain est d'environ 17% même si le gain en milles est de 7.3% ; ceci est dû à la fonction CT (Cf. section 5.2).

Les gains des distances varie entre 5% et 30% dépendamment de la valeur de *Max_déplacement*. Plus la valeur de *Max_déplacement* est grande, plus la liberté de déplacer les présentations devient grande, ce qui génère plus de gain.

Espacement

L'*espacement* est le paramètre qui permet d'harmoniser les passages des spectacles pour une même ville. La tendance est de se rapprocher le maximum possible de l'espacement idéal de chaque ville.

La figure 7.7 illustre un extrait d'exemple pour l'*espacement*. Dans cette figure, deux variantes sont présentées. Ces deux variantes dépendent du paramètre

Max_déplacement qui indique le maximum de semaines qu'on ne peut dépasser si on décale la date d'une présentation par rapport à sa date de programmation initiale. La première variante indique qu'il n'y aucune contrainte ($Max\_déplacement = \infty$) et la seconde limite *Max_déplacement* à 13 semaines. On remarque que plus il y a de liberté de modifier la planification initiale, plus le gain est intéressant.

On arrive a réduire l'espacement de 20% à 40% pour les différentes valeurs de *Max_déplacement*.

Un autre paramètre participant dans la composition de l'*espacement* et qui reflète les choix stratégiques du Cirque du Soleil est l'$Espacement_{min}$. Ce paramètre, par défaut égal à 52 semaines, détermine les contraintes d'espacement (3.5).

Nombre de villes

Le paramètre *nombre de villes* permet de trouver le meilleur sous ensemble de villes qui maximise le profit.

La figure 7.8 illustre un extrait d'exemple pour le *nombre de villes*. Dans cette figure, on montre les différents éléments qui influencent ce paramètre. Étant donné que l'algorithme 6.3 (nombre de villes) fait appel à l'optimisation des trois autres paramètres, ce paramètre dépend de tous les éléments qui participent dans les simulations.

Il dépend par exemple de la période de planification qui est déterminée par $Date_{début}$ et $Date_{fin}$, et qui permet pour des périodes longues d'avoir de meilleurs profits. Il dépend également de *K_semaines* et de $Durée_{min}$ qui influencent la *durée*. Pour $K\_semaines = \infty$, les profits sont meilleurs. En effet suite à la suppression d'une ville, la durée gagnée dg est généralement égale à la durée de la ville enlevée (Cf.

6.3). Les paramètres d'*espacement* et de *distance* (*Max_déplacement* en commun) qui déterminent les coûts des charges influencent également le profit possible avec un nombre de villes donné.

Les éléments spécifiques au paramètre *nombre de villes* sont le nombre de villes actives et le nombre minimal de villes exigé dans chaque tournée décrit dans les contraintes de cardinalité (3.7). La variation de ces deux éléments (en fixant tous les autres éléments) permet de générer des gains allant jusqu'a 5%.

7.2.2 Éditions

Les figures de (fig 7.9) à (fig 7.14) montrent quelques éditions que l'outil offre.

La figure 7.9 montre les différentes éditions possibles pour le revenu et les charges. On a la possibilité d'éditer les revenus et les charges de deux manières : une manière synthétisée et une autre détaillée. La synthèse des revenus et des charges permet de donner un résumé sur le profit, tandis que le détail des revenus et des charges montre chaque élément participant dans le profit ainsi que la valeur de sa participation. Les valeurs sont détaillées pour chaque semaine de présentation.

De plus, on peut visualiser les données par présentation, par spectacle, par ville ou par année.

La figure 7.10 montre un exemple d'édition qui représente un extrait des détails de charges d'une planification. Les valeurs sont mises à blanc pour raison de confidentialité.

Dans la suite, quelques extraits des éditions liées aux paramètres d'optimisation sont donnés. La forme générale de ces éditions est commune. Chaque édition débute par une description des paramètres choisis par l'utilisateur pour effectuer l'optimisation sélectionnée. Puis, le gain, les charges et les revenus sont décrits. Finalement, la planification optimale trouvée est présentée. On se contente ici de commenter à titre d'exemple, la figure 7.11 qui montre un extrait d'une optimisation basée sur l'algorithme optimiser (algorithme 6.6). Les autres éditions sont de même nature que la figure 7.11 et peuvent être interprétées facilement en se basant sur le commentaire associé à cette figure.

- Dans la figure 7.11, la date de début et la date fin correspondant à $Date_{début} = 1/1/2007$ et $Date_{fin} = 1/1/2010$ montrent la période sur laquelle la planification est effectuée.

- $K\_semaines = 1$ indique les contraintes de durée : on ajoute ou on supprime une semaine.

- $Espacement_{min} = 52$ définit les contraintes d'espacement.

- $Max\_déplacement = 13$ définit le changement maximal autorisée à la planification initiale.

- Gain durée, gain espacement et gain distance montrent les gains associés à chaque paramètre pris individuellement, le gain optimal étant la somme de ces gains.

- Revenu total et charge total indiquent les revenus et les charges.

- Solution optimale montre la solution trouvée. On présente dans cette figure un extrait de cette solution.

Pas de changement avant le 1er janvier 2006

Villes	Distances
Montreal	156
Quebec City	490
Toronto	2186
Santa Monica	41
Orange County	378
San Francisco	43
San Jose	935
Denver	906
Chicago	794
Dallas	242
Houston	139
Austin	826
Atlanta	732
New York	189
Boston	394
Washington	933
Miami	617
Charlotte / Raleigh	503
Memphis / Nashville	782
Baltimore	276
Hartford	393
Pittsburgh	115
Cleveland	98
Detroit / Minneapolis	1582
Calgary	413
Vancouver	124
Seattle	150
Portland	829
Pomona	1560
St.Louis	257
Nashville	1079
Monterrey	395
Guadalajara	285
Mexico City	0
	AVANT
Total en miles	18822

Cirque 2005

Villes	Distances
Montreal	156
Quebec City	490
Toronto	2186
Santa Monica	41
Orange County	335
San Jose, CA	43
San Francisco, C	961
Denver, CO	906
Chicago, IL	794
Dallas, TX	242
Houston, TX	139
Austin, TX	1105
Miami, FL	617
Atlanta, GA	527
Washington, DC	205
New York, NY	189
Boston, MA	90
Hartford, CT	276
Baltimore, MD	200
Pittsburgh, PA	115
Cleveland, OH	98
Detroit, MI	506
Charlotte, NC	503
Memphis, TN	1633
Calgary, AB	413
Vancouver, BC	124
Seattle, WA	150
Portland, OR	829
Pomona, CA	1560
Saint Louis, MO	257
Nashville, TN	1079
Monterrey	395
Guadalajara	285
Mexico city	0
	APRES
	17449

Figure 7.6: Extrait de résultats pour l'optimisation de la *distance*.

Villes	Plan initial	aucune contrainte		Déplacement d'au plus 13 semaines	
	espacement avant	après	variation	après	variation
Orange_County	99 semaines	99 semaines	0 semaines	99 semaines	0 semaines
Denver	104 semaines	104 semaines	0 semaines	104 semaines	0 semaines
Boston	156 semaines	88 semaines	68 semaines	156 semaines	0 semaines
Washington	155 semaines	105 semaines	50 semaines	155 semaines	0 semaines
Dallas	98 semaines	100 semaines	-2 semaines	98 semaines	0 semaines
Houston	96 semaines	96 semaines	0 semaines	96 semaines	0 semaines
Austin	97 semaines	97 semaines	0 semaines	97 semaines	0 semaines
Pittsburgh	163 semaines	105 semaines	58 semaines	146 semaines	17 semaines
Baltimore	145 semaines	106 semaines	39 semaines	116 semaines	29 semaines
Hartford	143 semaines	116 semaines	27 semaines	128 semaines	15 semaines
Detroit	148 semaines	113 semaines	35 semaines	140 semaines	8 semaines
Miami	100 semaines	109 semaines	-9 semaines	119 semaines	-19 semaines
Charlotte	91 semaines	102 semaines	-11 semaines	118 semaines	-27 semaines
Seattle	129 semaines	104 semaines	25 semaines	108 semaines	21 semaines

Figure 7.7: Extrait de résultats pour l'optimisation de l'*espacement.*

```
Date Debut :  1/ 1/2007
Date Fin    : 1/ 1/2010
Max_K_semaines = 1
Min_semaines = 4
Nbre_villes   corteo      : 30  Nbre_villes_actives= 19
Min_nbre_villes Corteo    : 13  Nbre_villes_optimal: 17

GAIN OPTIMAL : XXXXX
GAIN total   : XXXXXX
Revenu total : XXXXXXX
Charge totale: xxxxxxxx

SOLUTION OPTIMALE :
------------------------------------------------------------------------------------

    SPECTACLE          VILLE        DUREE   Variation      DATE DEBUT     DATE FIN

      Corteo      Orange_County       8        1          8/ 2/2007     23/12/2007
      Corteo             Denver       9        3         13/ 4/2007     24/ 6/2007
      Corteo         Washington      -7      -14          8/ 6/2007     27/ 5/2007 Delete
      Corteo           Hartford       6        1         14/ 6/2007     17/ 2/2008
      Corteo             Dallas       6        1         29/ 6/2007     30/ 9/2007
      Corteo            Houston       6        1         16/ 8/2007      6/ 7/2008
      Corteo             Austin       5        1          4/10/2007     23/12/2007
      Corteo              Miami       8        1         23/11/2007     24/ 2/2008
      Corteo           Portland       6        1         31/ 1/2008     13/ 4/2008
      Corteo            Seattle       6        1         20/ 3/2008     25/ 5/2008
      Corteo          Vancouver       7        1          8/ 5/2008     13/ 7/2008
      Corteo            Calgary       7        1          3/ 7/2008     24/ 8/2008
      Corteo          Baltimore      11        6         28/ 8/2008      9/11/2008
      Corteo           Columbus      -5      -10         27/11/2008     19/10/2008 Delete
      Corteo      St_Petersburg       9        5         14/11/2008     11/ 1/2009
```

Figure 7.8: Extrait de résultats pour l'optimisation du *nombre de villes.*

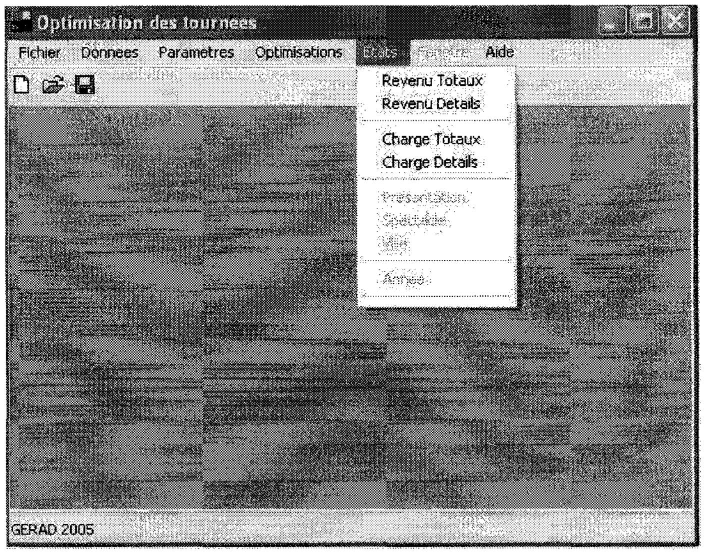
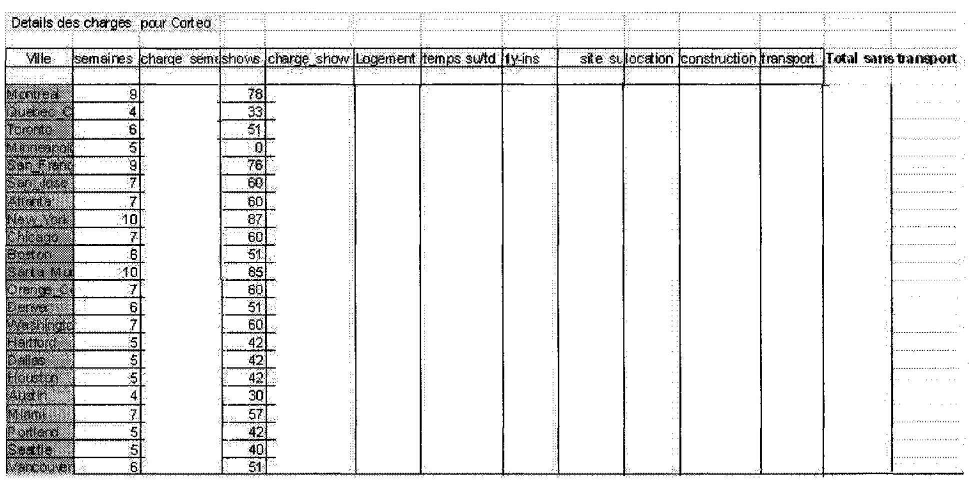


Figure 7.9: Menu indiquant les rapports d'édition.



Details des charges pour Corteo

Ville	semaines	charge sem	shows	charge_show	Logement	temps su/td	fly-ins	site su	location	construction	transport	Total sans transport
Montreal	9		78									
Quebec_C	4		33									
Toronto	6		51									
Minneapoli	5		0									
San_Franc	9		76									
San_Jose	7		60									
Atlanta	7		60									
New_York	10		87									
Chicago	7		60									
Boston	6		51									
Santa_Mo	10		85									
Orange_C	7		60									
Denver	6		51									
Washingto	7		60									
Hartford	5		42									
Dallas	5		42									
Houston	5		42									
Austin	4		30									
Miami	7		57									
Portland	5		42									
Seattle	5		40									
Vancouver	6		51									

Figure 7.10: Extrait d'un rapport d'édition des détails des charges

```
Date Debut :  1/ 1/2007
Date Fin   :  1/ 1/2010
K_semaines = 1
Espacement_min = 52 semaines
Espacement_ideal = 104 semaines
Max_deplacement    = 13 semaines
GAIN DUREE : xxxxxx
GAIN ESPACEMENT : xxxxxxx
GAIN DISTANCE : xxxxxx $        GAIN MILLES : xxxx milles
GAIN OPTIMAL : xxxxxxxx
GAIN total    : xxxxxxxx
Revenu total : xxxxxxxx
Charge totale: xxxxxxxx

SOLUTION OPTIMALE :
```

SPECTACLE	VILLE	DUREE	Variation	DATE DEBUT	DATE FIN
Corteo	Montreal	9	0	21/ 4/2005	19/ 6/2005
Corteo	Quebec_City	4	0	30/ 6/2005	24/ 7/2005
Corteo	Minneapolis	5	0	23/ 9/2005	23/10/2005
Corteo	Orange_County	6	-1	8/ 2/2007	6/ 5/2007
Corteo	Denver	6	0	18/ 5/2007	1/ 7/2007
Corteo	Washington	7	0	30/ 3/2007	13/ 5/2007
Corteo	Hartford	6	1	12/ 7/2007	19/ 8/2007
Corteo	Dallas	5	0	31/ 8/2007	30/ 9/2007
Corteo	Houston	5	0	18/ 1/2008	24/ 2/2008
Corteo	Miami	7	0	6/12/2007	27/ 1/2008

Figure 7.11: Extrait d'un rapport d'édition basé sur l'algorithme 6.6.

```
Date Debut :  1/ 1/2007
Date Fin   :  1/ 1/2010
Max_K_semaines = 1
Min_semaines = 4
GAIN OPTIMAL : xxxxxxxx
GAIN total    : xxxxxxxxx
Revenu total : xxxxxxxxx
Charge totale: xxxxxxxxxx
Nombre d'iterations :  30
Gain genere a l'iteration :  12

SOLUTION OPTIMALE :
```

SPECTACLE	VILLE	DUREE	Variation	DATE DEBUT	DATE FIN
Corteo	Montreal	9	0	21/ 4/2005	19/ 6/2005
Corteo	Quebec_City	4	0	30/ 6/2005	24/ 7/2005
Corteo	Toronto	6	0	4/ 8/2005	10/ 9/2005

Figure 7.12: Extrait d'un rapport d'édition basé sur la *durée.*

Date de reference : 1/ 1/2007

Date Fin : 1/ 1/2010

GAIN OPTIMAL : XXXXXX $

GAIN MILLES : 1877 milles

Nombre d'iterations : 16

Gain genere a l'iteration : 6

SOLUTION OPTIMALE :

SPECTACLE	VILLE	DUREE	DISATNCE	DATE DEBUT	DATE FIN
Corteo	Montreal	9	156	21/ 4/2005	19/ 6/2005
Corteo	Quebec_City	4	490	30/ 6/2005	24/ 7/2005
Corteo	Toronto	6	667	4/ 8/2005	10/ 9/2005
Corteo	Minneapolis	5	1591	23/ 9/2005	23/10/2005
Corteo	San_Francisco	9	51	11/11/2005	8/ 1/2006

Figure 7.13: Extrait d'un rapport d'édition basé sur la *distance.*

Date Debut : 1/ 1/2007

Date Fin : 1/ 1/2010

Espacement_min_interdit = 52 semaines

Espacement_parfait = 104 semaines

Max_deplacement = 13 semaines

GAIN OPTIMAL : XXXXXXX

Nombre d'iterations : 15
Gain genere a l'iteration : 10

SOLUTION OPTIMALE :

SPECTACLE	VILLE	DUREE	ESPACEMENT	Variation	DATE DEBUT	DATE FIN
Cirque2007	Montreal	9	104	0	19/ 4/2007	17/ 6/2007
Cirque2007	Toronto	7	99	0	28/ 6/2007	12/ 8/2007
Cirque2007	Chicago	7	65	-11	8/11/2007	23/12/2007
Cirque2007	San_Francisco	9	92	10	23/ 8/2007	21/10/2007
Cirque2007	San_Jose	7	102	0	3/ 1/2008	17/ 2/2008
Cirque2007	Atlanta	7	116	-13	5/ 6/2008	20/ 7/2008

Figure 7.14: Extrait d'un rapport d'édition basé sur l'*espacement.*

CONCLUSION

Dans ce mémoire, nous nous sommes plus particulièrement intéressés à trois points :

- la formalisation du problème, c'est-à-dire la caractérisation des différents éléments devant être pris en compte lors de la planification des tournées ainsi que la définition d'une fonction objective.

- l'élaboration d'un module de résolution des problèmes d'optimisation, soit le choix des algorithmes et leur adaptation à l'environnement décisionnel.

- le respect des préférences de l'utilisateur : l'interface homme machine (IHM) et la représentation des données (SGBD) et des résultats (reports).

Via l'IHM, le planificateur accède à des représentations des données qui sont synthétiques, significatives et compréhensibles ; ces données sont celles qui ont été identifiées comme pertinentes pour décrire les tournées. L'outil de résolution assiste le planificateur dans l'évaluation des solutions qu'il propose. Nous nous sommes basés sur les heuristiques et, plus particulièrement, sur la Recherche Tabou pour l'évaluation des solutions.

Tout au long de ce travail, nos choix ont été guidés par notre souci de proposer un outil dont la compréhension du fonctionnement puisse être accessible intuitivement. Nous avons essayé d'éviter l'appel à des boîtes noires, tout comme l'utilisation de mesures trop synthétiques en ce qui concerne la formulation du problème. Nous nous sommes donc restreints à des mesures simples et significatives en se basant sur un modèle multi-objectif.

L'outil proposé a pour rôle d'assister le planificateur dans la phase de conception de la solution. Il vérifie la faisabilité de la solution et propose des améliorations possibles selon des critères choisis par le planificateur. Ces critères se basent sur les quatre pistes d'optimisation avec des possibilités de combinaison de ces pistes. En plus, un ensemble de paramètres est mis à la disposition du planificateur pour affiner ces critères. Il peut activer et désactiver des villes, décider des changements possibles, etc...

Une continuité possible de ce travail peut se diviser en deux catégories. La première catégorie concerne la proposition des alternatives (solutions) et l'autre concerne l'Interface Homme Machine. Pour la proposition des alternatives, l'outil actuel ne propose pas de planification initiale. Ainsi, on peut étendre le travail pour proposer des planifications répondant aux choix décisionnels, le cas échéant compléter des planifications partielles. En ce qui concerne, l'IHM on peut améliorer l'outil proposé pour un Système d'Information Géographique (SIG) qui permet de visualiser sur une carte géographique toutes les données importantes liées aux villes ainsi que les résultats des simulations. On peut alors visualiser chaque tournée, les critères appliqués et le profit généré à chaque simulation.

BIBLIOGRAPHIE

ARCHETTI,C. HERTZ, A. et SPERANZA, M.G. (2005). Metaheuristics for the team Orienteering Problem. *Cahiers du GERAD G-2005-47, École des Hautes Études Commerciales, Canada.*

BALAS, E. (1989). The prize collecting traveling salesman problem. *Networks 19, pages 621-636.*

BLUM, A., CHAWLA, S., KARGER, D.R., LANE, T., MEYERSON, A., et MINKOFF, M. (2003). Approximation Algorithms for Orienteering and Discounted-Reward TSP. *Proceedings of the 44th Annual IEEE Symposium on Foundations of Computer Science, pages 46-55.*

CORDEAU, J.F., et LAPORTE, G. (2004). Tabu Search Heuristics for the Vehicle Routing Problem. *Metaheuristic Optimization via Memory and Evolution: Tabu Search and Scatter Search, C. Rego and B. Alidaee (eds), Kluwer, Boston, pp. 145-163.*

DANTZIG, G.B., FULKERSON, D.R., et JOHNSON, S.M. (1954). Solution of large scale travelling salesman problem. *Operations Research, Vol. 2, pages 393-410.*

FEILLET, D., DEJAX, P. ET LAPORTE, G. (2004). Traveling Salesman problems with profits. *Transportation Science.*

GLOVER, F. (1986). Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Computers and Operations Research, tome 13, pages 533-549.*

HERTZ,A. (2005). Les métaheuristiques : quelques conseils pour en faire bon usage.

Gestion de Production et Ressources Humaines : méthodes de planification dans les systèmes productifs, Presses Internationales de Polytechnique, 205-222.

HERTZ, A., et KOBLER, D. (2000). A framework of the description of evolutionary algorithms. *European Journal of Operational Research, tome 126, no 1, pages 1-12.*

HOLLAND, J.H. (1975). Adaptation in Natural and Artificial Systems. *MIT Press, Cambridge, Mass.*

KARP, R.M. (1972). Reducibility among combinatorial problems. *Complexity of Computer Computations, Plenum Press, pages 185-204.*

KELLER, P. (1989). Algorithms to solve the orienteering problem: a comparison. *European Journal of Operational of Operational Research, No. 41, pages 224-231.*

KIRKPATRICK, S., GELATT, C., et VECCHI,M. (1983). Optimisation by simulated annealing. *Science, tome 220, no 4598, pages 671-680.*

LAPORTE, G., et MARTELLO, S. (1990). The selective traveling salesman problem. *Discrete Applied Mathematics, No. 26, pages 193-207.*

LÉVINE, P. et POMEROL, J.C. (1989). Systèmes interactifs d'aide à la décision et systèmes experts. *Edition Hermès. Collection Traité des nouvelles technologies.*

LIANG, Y.C., KONAK S.K. et SMITH A.E. (2002). Meta heuristics for the Orienteering Problem. *Proceedings of the congress on Evolutionary Computation(CEC 02), pages 384-389.*

NOWAK, M,A. (2005). The Pickup and Delivery Problem with Split Loads. *Thèse de doctorat, Industrial and Systems Engineering, Georgia Institute of Technology, US.*

POMEROL, J.C. (1995). The Role of the Decision Maker in DSSs and Representation

Levels. *Proceeding of the* 28^{th} *Annual Hawaii international Conference on system sciences, pages 42-51.*

TASGETIREN, M.F. et SMITH A.E. (2000). A Genetic Algorithm for the Orienteering Problem. *Proceedings of the 2000 Congress on Evolutionary Computation, San Diego, CA, July 2000, pages 1190-1195.*

TURBAN, E. (1993). Decision Support and Expert Systems. *Edition Macmillan.*

VILLENEUVE, D. (1999). Logiciel de génération de colonnes. *Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal, Canada.*

ANNEXE A : RECHERCHE TABOU ET LA FABLE DES RANDONNEURS

Cet annexe, montrant le fonctionnement de la Recherche Tabou, est extrait du site web suivant :

http://www.cours.polymtl.ca/mth6414/automne2004/presentations/MTH6414_Recherche_Tabou.pdf

Un randonneur malchanceux est perdu dans une région montagneuse. Toutefois, il sait qu'une équipe de secours passe régulièrement par le point situé à la plus basse altitude dans la région. Ainsi, il doit se rendre à ce point pour attendre les secours. Comment s'y prendra-t-il ? Il ne connaît pas l'altitude de ce point et, à cause du brouillard, il ne voit pas autour de lui. Donc, arrivé à un croisement, il doit s'engager dans une direction pour voir si le chemin monte ou descend.

Tout d'abord, il commence par descendre tant qu'il peut, en choisissant le chemin de plus grande pente à chaque croisement.

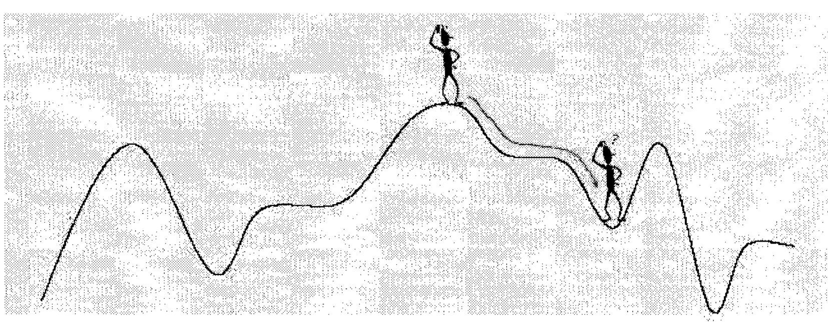


Figure A.1: Recherche d'un minimum local.

Puis, lorsqu'il n'y a plus de sentier menant vers le bas, il décide de suivre le chemin qui remonte avec la plus faible pente car il est conscient qu'il peut se trouver à un minimum local.

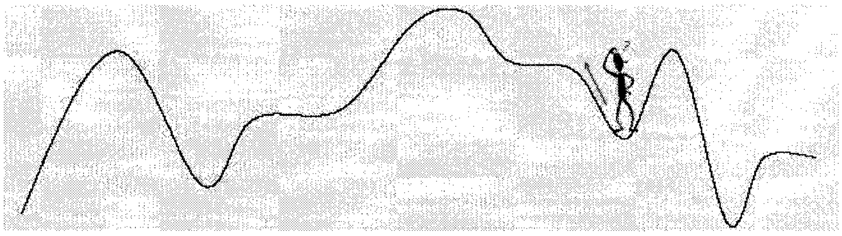


Figure A.2: Exploration du voisinage du minimum local

Toutefois, dès qu'il remonte, il redescend vers le point où il était. Cette stratégie ne fonctionne pas. Par conséquent, il décide de s'interdire de faire marche arrière en mémorisant la direction d'où il vient. Il est à noter que sa mémoire ne lui permet de mémoriser que les deux dernières directions prohibées.

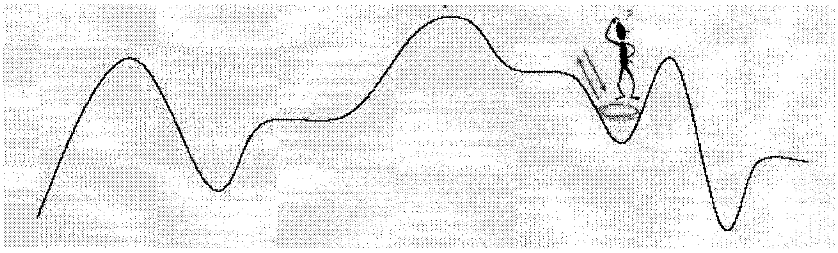


Figure A.3: Boucle sur le minimum local : introduction de la liste tabou.

Cette nouvelle stratégie lui permet d'explorer des minimum locaux et d'en ressortir. À un moment donné, il arrive à un point où il décèle une forte pente descendante vers le sud. Toutefois, les directions mémorisées lui interdisent d'aller vers le sud car cette direction est prohibée. Il décide d'ignorer cette interdiction et emprunte ce chemin.

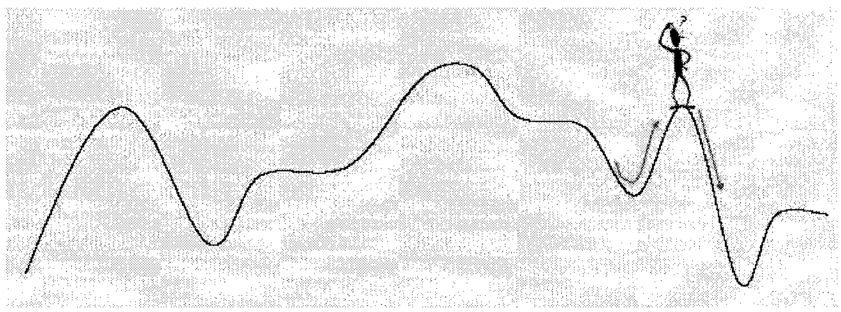


Figure A.4: Aspiration : Choisir une meilleur solution même si c'est tabou.

Cette décision fut bénéfique: il arriva au point de plus basse altitude et attendit les secours qui ne tardèrent à arriver.

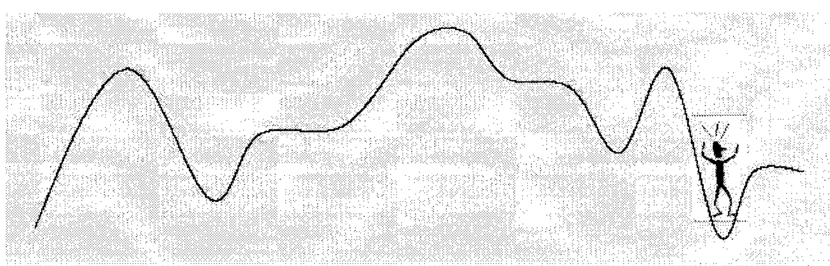


Figure A.5: Critères d'arrêt : Solution optimale.