

spécifiquement un travailleur qui ne fait affaire qu'avec un seul fournisseur de produits. Cependant, nous pouvons généraliser notre approche du problème au cas où plusieurs fournisseurs approvisionnent le travailleur autonome. Ce dernier se retrouve parfois à occuper un poste qui est nouveau pour lui. Il est possible que le travailleur effectuait la distribution des produits en tant qu'employé de l'entreprise concernée, avant de devenir autonome. Mais, étant donné les restructurations des entreprises qui veulent plus qu'auparavant se départir de certaines de leurs fonctions, l'entreprise n'est peut-être plus intéressée par la responsabilité directe de la distribution. Elle vend donc ses routes de distribution à ses employés. Ceux-ci, s'ils acceptent cette nouvelle fonction, se retrouvent du jour au lendemain avec une responsabilité accrue, dans la mesure où ils deviennent maintenant des gestionnaires préoccupés autant de la qualité du travail que des coûts. Ils doivent décider eux-mêmes, par exemple, des routes de distribution à suivre et des horaires des visites des clients, ce qui n'était pas le cas auparavant. Le travailleur autonome est donc rémunéré en fonction de la quantité de marchandise qu'il écoule auprès des clients sans que son fournisseur ne tienne compte des frais qu'il engage.

Dans le contexte qui nous préoccupe, les frais variables du travailleur autonome sont surtout du côté des frais liés au transport. Ces frais peuvent être dépendants des distances parcourues et/ou des temps de parcours. Il existe souvent un lien entre les deux. Dans un milieu urbain, les coûts de transport sont plus souvent tributaires des temps de parcours. Le trafic plus intense, les travaux sur certaines rues ou les accidents plus fréquents font qu'il serait alors préférable de privilégier la minimisation des coûts reliés au temps de parcours.

Dans un milieu plus rural ou moins fortement urbanisé, les temps de parcours varient peu d'un jour à l'autre ou d'une semaine à l'autre. Dans ce cas, le fait de minimiser les coûts reliés aux distances parcourues aurait un impact plus grand sur la réduction des coûts de transport. Nous avons choisi de traiter cette situation. Il est à remarquer que si nous avons minimisé les temps de parcours au lieu des distances, cela n'aurait pas modifié notre approche de résolution.

Le travailleur autonome œuvrant dans le secteur agro-alimentaire ne connaît pas toujours à l'avance les quantités de produits qu'il devra livrer chez chaque client. Il peut avoir une bonne idée, selon son expérience passée, des quantités habituellement consommées chez chaque client mais il n'a aucune certitude. Dans la plupart des cas, son travail consiste à se présenter chez le client, à vérifier ce qu'il reste sur les tablettes ou dans l'entrepôt et à combler les besoins en remplissant les tablettes. D'une fois à l'autre, il ne sait donc pas quel sera son temps d'intervention chez les clients, ni si les stocks contenus dans son camion seront suffisants pour combler les besoins de ses clients. Il y a donc un élément d'incertitude important dans ce problème. Puisque le travailleur est généralement une personne d'expérience, nous avons choisi, pour les besoins de cet article, de ne pas prendre en considération l'aspect stochastique du

problème. Il nous semblerait cependant nécessaire d'en tenir compte éventuellement et nous nous proposons de le faire lors de travaux futurs.

Ainsi, le travailleur autonome se rend tous les matins pour s'approvisionner à l'entrepôt de son fournisseur. Pour notre application, la journée de travail se divise en deux parties puisqu'il s'accorde une heure pour son repas du midi. Il revient le soir à l'entrepôt où il laisse son camion. Une journée de travail débute généralement à 5 h à l'entrepôt. Il y a une pause pour le déjeuner après sa visite à l'entrepôt. Il y a également une pause repas du midi entre 12 h et 13 h mais, selon les clients qu'il a rencontrés le matin, cela peut être plus ou moins durant cet intervalle de temps. Il retourne à l'entrepôt en fin d'après-midi entre 16 h et 17 h 30. Le samedi est une journée où il a moins de clients à desservir et, par conséquent, il termine sa journée de travail à 15 h au plus tard. Le lundi et le dimanche sont des journées de congé. Évidemment, les heures mentionnées sont à titre indicatif puisqu'en tant que travailleur autonome, il peut, si nécessaire, travailler plus tard ou terminer moins tard selon les besoins ponctuels. Les retours à l'entrepôt durant une même journée sont très rares. Nous n'en tiendrons pas compte.

Le problème est donc de déterminer les trajets quotidiens pour la livraison des produits aux divers clients du travailleur autonome de façon à minimiser les distances parcourues.

3. Contraintes et données du problème

Afin de résoudre le problème brièvement décrit dans la section précédente, nous devons considérer certaines contraintes auxquelles doit faire face le travailleur autonome. Il faut aussi déterminer le type de données dont nous aurons besoin et nous devons nous assurer qu'elles sont les plus exactes possibles.

3.1 Contraintes

Nous considérons deux types de contraintes.

Contraintes liées à la clientèle

Le temps d'intervention : Pour certains points de livraison, le temps d'intervention comprend les temps de déplacement du camion à l'entrée du magasin, de la visualisation des produits manquants, du retour au camion, de la prise de produits dans le camion, du retour dans le magasin, du remplissage du bon de commande, du rangement sur les rayons et du retour au camion pour reprendre la route.

Pour d'autres points de livraison, il ne faut pas prendre en considération le décompte des produits manquants et la mise en rayon puisque le travailleur connaît alors la quantité des

produits à livrer et le personnel du point de livraison range lui-même les articles livrés. Cette situation est de plus en plus rare.

Le temps d'intervention dépend, dans une certaine mesure, de la catégorie à laquelle appartient le client. Les clients plus importants du type « Club d'achat » ou achat en gros et supermarché peuvent avoir un temps d'intervention allant jusqu'à une heure. Les plus petits clients du type épicerie ou dépanneur ont plutôt un temps d'intervention qui tourne autour de quinze minutes.

La fréquence des livraisons : Les clients peuvent recevoir la visite du travailleur autonome entre une et cinq fois par semaine. Certains clients sont donc visités tous les jours du mardi au samedi. Dans notre cas, les clients devant être visités deux fois par semaine, le sont le mardi et le vendredi. Ceux qui reçoivent des livraisons quatre fois par semaine, sont visités les mardi, mercredi, jeudi et samedi. Pour ce qui est des ravitaillements de une et trois fois par semaine, le travailleur autonome a entièrement le choix quant aux jours où il visitera ces clients. Habituellement, ces derniers s'accommodent fort bien de cette façon de faire.

Les horaires de visite : Certains clients ont des exigences du point de vue des horaires de visite. Ainsi, certains magasins souhaitent être visités le matin ou l'après-midi avant telle ou telle heure. Dans des cas plus particuliers, les clients imposent des heures de visite très strictes. Le travailleur autonome n'a donc pas le choix de tenir compte de ces requêtes pour effectuer ses livraisons.

Contraintes liées au travailleur autonome

Les repas : Le travailleur autonome désire prendre son repas du midi entre approximativement 12 h et 13 h à la maison. Son domicile devient alors un point de visite, de la même façon que ses clients. Il prend environ une heure pour ce repas.

Pour le déjeuner, il préfère le prendre entre 6 h et 6 h 30 c'est-à-dire après qu'il ait rempli son camion à l'entrepôt du fournisseur. Ce repas dure environ une demi-heure.

Les heures de repas dépendent principalement de ses livraisons. Il privilégie de bien desservir ses clients au moment désiré plutôt que de prendre ses repas à heure fixe.

Le travail : Nous avons déjà mentionné que la journée de travail débute à 5 h et se termine entre 16 h et 17 h 30 sauf le samedi où la journée se termine avant 15 h.

3.2 *Données*

La description des contraintes nous indiquent quelles sont les données dont nous aurons besoin pour déterminer les trajets quotidiens du travailleur autonome effectuant ses livraisons.

Nous devons connaître les distances entre les divers points de livraison, l'entrepôt, le domicile du travailleur autonome ainsi que le lieu de son déjeuner. Pour ce faire, nous avons travaillé avec un travailleur autonome qui a amassé ces données pour nous. Il n'avait pas d'idée précise lui-même des distances réelles qu'il parcourait. Cela lui a donc permis d'en prendre conscience en les notant.

Nous lui avons également demandé de déterminer les temps de parcours bien que nous n'avons pas utilisé ces données lors des tests numériques. De plus, les temps d'intervention ont également été notés et ce, pour plusieurs semaines, afin de vérifier si on pouvait déceler une moyenne de temps d'intervention pour chaque client. Ces temps pouvaient être assez variables tout en étant dans un même ordre de grandeur. C'est la raison pour laquelle nous avons décidé de considérer une moyenne des temps d'intervention.

Les temps d'intervention n'ont cependant pas été directement utilisés dans la résolution du problème. En effet, lors de la résolution du problème, nous avons choisi de déterminer la séquence des clients à visiter pour un jour donné sans tenir compte, de façon explicite, des heures de livraison imposées par certains clients ni des temps d'intervention. Ce choix nous a permis de faciliter la résolution du problème. De plus, nous avons noté que les clients qui exigeaient des heures précises de livraison souhaitaient tous recevoir la visite du travailleur autonome très tôt le matin. La séquence de visite pour ces clients s'imposait, de par leurs exigences respectives, sans que nous ayons à résoudre quelque problème que ce soit. C'est un peu comme si la séquence de visite pour ces clients avait été imposée. De plus, le travailleur autonome étant assez souple quant à ses heures de repas et de fin de journée de travail, il n'était pas essentiel de tenir compte explicitement des temps d'intervention. En effet, l'imprécision des temps d'intervention nous empêche de fixer une plage horaire rigide pour la période du dîner. Par exemple, si tous les clients visités le matin prenaient le double du temps d'intervention estimé, le travailleur autonome ne pourrait prendre son repas du midi entre 12 h et 13 h. Le modèle mathématique que l'on peut trouver en annexe comprend tous les aspects du problème, y inclus le respect des temps de déplacement et des temps d'intervention et les contraintes d'élimination de sous-tours.

Un des problèmes que nous n'avons pas analysé en profondeur est celui de l'affectation des clients aux journées de distribution, soit du mardi au samedi. La fréquence des visites des clients étant imposée par le fournisseur et le nombre de clients à visiter hebdomadairement relativement élevé facilitait grandement l'affectation des clients. La répartition des clients en

fonction des journées de distribution a été relativement facile. Par contre, rien ne nous prouve que nous ne pourrions trouver une meilleure répartition. L'utilisation de l'outil *Hierarchical Cluster Analysis* du logiciel SPSS, par exemple, pourrait nous être fort utile pour valider ou améliorer notre affectation initiale des clients.

4. Approches de résolution

Le problème de détermination des trajets quotidiens de livraison est un problème qui s'apparente à celui du commis voyageur. Tel que décrit dans la section précédente, nous avons mis de côté les contraintes qui auraient rendu le problème encore plus complexe à résoudre, sans que cela ne nous empêche d'obtenir des solutions fort valables. Il est bien connu que le problème du commis voyageur est un problème difficile car c'est un problème NP-complet. Nous ne prétendons pas pouvoir le résoudre de façon exacte sauf pour les petits problèmes du travailleur autonome.

Trois approches ont été prises en compte. Ces trois approches ont été considérées pour différentes raisons. La première approche est une approche graphique facile et naturellement utilisée par le travailleur autonome. La seconde est une heuristique basée sur celle de Lin et Kemighan (1973). Finalement, la dernière est la résolution optimale à l'aide du logiciel CPLEX. Rappelons que la solution proposée au travailleur autonome doit être obtenue par une méthode et un outil simple à utiliser et évidemment peu coûteux. Cela a guidé notre choix d'une approche définitive de méthode de résolution du problème.

- Approche graphique : Cette approche en est une *ad hoc* où, à l'aide d'un plan, nous situons les clients graphiquement et nous tentons de déterminer une séquence de visites qui soit la plus courte possible en terme de distances parcourues. Il n'y a aucune garantie d'obtention de la solution optimale. Elle reflète la façon de faire du travailleur autonome qui prend le temps de consulter un plan. C'est l'approche la moins coûteuse mais la moins précise. Cependant, pour de petits problèmes, elle pourrait être compétitive en terme d'efficacité. Les résultats numériques de la section suivante nous indiquent que, dans notre cas, les résultats de l'approche graphique sont plus élevés.
- Approche heuristique : Comme nous le mentionnons plus haut, c'est une heuristique qui ne garantit pas l'obtention de la solution optimale mais qui donne de très bons résultats. Elle fonctionne par étapes. À partir d'une tournée initiale, nous tentons d'en améliorer la distance totale en échangeant certaines arêtes. Nous décrivons cette heuristique plus en détails dans la prochaine sous-section.
- Méthode exacte : Cette dernière approche consiste tout simplement à résoudre de façon exacte le problème de détermination des trajets quotidiens, modélisé comme un problème

de programmation linéaire en nombres entiers. Le logiciel que nous avons utilisé est CPLEX. Ce logiciel est connu pour sa vitesse de résolution. Nous l'avons utilisé afin de valider et comparer les résultats que nous avons obtenus à l'aide de l'heuristique. La raison pour laquelle nous n'avons pas retenu cette approche et ce logiciel pour le cas du travailleur est le coût d'achat du logiciel trop élevé pour le travailleur. De plus, son utilisation aurait nécessité une formation spécifique qui dépassait la formation de base du travailleur.

Nous avons utilisé comme approche heuristique, pour résoudre notre problème de tournée, l'approche proposée par Lin et Kemighan (1973). Bien que cette approche date de plusieurs années, elle nous est apparue comme étant efficace et simple à implanter et à utiliser. La méthode de Lin et Kemighan ne garantit pas nécessairement l'obtention d'une solution optimale mais elle donne des résultats très compétitifs et qui sont souvent optimaux pour plusieurs problèmes. Puisque nous devons traiter des problèmes de taille relativement petite, cette méthode de résolution est tout à fait appropriée.

C'est une méthode qui se base sur les méthodes d'échanges puisqu'il s'agit, à partir d'un tour initial, d'améliorer la tournée en échangeant des arêtes pour d'autres qui permettent de réduire la longueur de la tournée. Le choix des arêtes à échanger lors du processus de résolution constitue l'aspect le plus important et le plus délicat. Lors d'un échange d'arêtes, il faut que des économies aient été générées en terme de longueur de la tournée à parcourir. À partir d'une arête nouvellement ajoutée au tour, on répète le processus afin de déterminer une arête joignant une des extrémités de l'arête nouvelle qui pourrait être retirée pour améliorer la longueur du tour. Il s'agit donc d'un processus itératif qui se répète tant et aussi longtemps que chaque nœud ou chaque ville devant faire partie du tour n'a pas été considéré comme ville de départ ou si aucune amélioration ne peut plus être obtenue. Puisque chaque point de livraison doit être considéré comme point de départ, plus le nombre de nœuds est élevé, plus le temps de résolution sera élevé. De plus, la qualité de la solution peut dépendre de la tournée initiale. Avec le problème de détermination des trajets quotidiens du travailleur autonome, nous demeurons dans une limite fort acceptable quant à la taille des problèmes traités.

Pour plus de détails sur la description de la méthode heuristique pour résoudre le problème du commis voyageur ou le problème de tournée, nous invitons les lecteurs intéressés à consulter l'annexe II.

5. Résultats numériques

Le problème de détermination des séquences des visites des clients que doit résoudre un travailleur autonome est un problème de petite taille. La complexité de la résolution d'un tel problème est donc limitée. Le défi réel auquel nous devons faire face consiste à trouver une

méthode de résolution rapide, efficace et surtout peu coûteuse. Tout logiciel spécialisé dans la résolution de problèmes de programmation linéaire en nombres entiers était donc exclu comme outil que le travailleur aurait pu utiliser, pour des raisons de coûts et non pas d'efficacité. Nous avons cependant résolu nos problèmes à l'aide du logiciel CPLEX afin d'en comparer les résultats avec ceux obtenus par la méthode graphique et surtout par l'heuristique. Des problèmes de différentes tailles (5, 10 et 15 nœuds ou clients) ont été générés aléatoirement. Pour chaque taille, cinq problèmes ont été testés. Ils ont tous été testés à l'aide des trois approches décrites dans les sections 3 et 4. Le tableau 1 présente les résultats quant aux tours et aux longueurs des tournées obtenus avec les trois approches.

Problème	Méthode cartographique	Algorithme	Programmation linéaire
A-5	24	21	21
B-5	21	21	21
C-5	22	22	22
D-5	28	28	28
E-5	35	32	32
A-10	30	30	30
B-10	32	29	29
C-10	32	31	31
D-10	40	31	31
E-10	38	38	38
A-15	40	34	34
B-15	41	35	35
C-15	33	32	32
D-15	39	34	33
E-15	40	34	33

Tableau 1 : Longueurs des tournées selon trois approches

Nous constatons que l'approche graphique, qui reflète comment le travailleur autonome peut s'y prendre s'il le fait de façon un peu plus rigoureuse pour déterminer les séquences de ses visites, est l'approche la moins efficace. Elle donne les moins bons résultats et exige tout de même assez de temps pour obtenir une tournée. Nous avons pu valider les résultats obtenus par l'approche heuristique en examinant la solution optimale fournie par CPLEX. Pour $n=5$ et $n=10$, nos résultats sont optimaux même si les tournées peuvent varier. Cela indique qu'il existe plus d'une solution optimale à ce problème. Notons, par exemple, que la tournée obtenue pour le

problème A10 à l'aide de l'heuristique est 1, 29, 28, 50, 5, 9, 36, 57, 6, 39, 26 (les numéros sont associés à des clients), pour une distance totale de 30. Celle obtenue avec CPLEX est 1, 26, 39, 6, 57, 36, 9, 5, 50, 28, 29, pour la même distance. Notre heuristique réussit à résoudre les différents problèmes en une fraction de seconde. Elle est donc efficace et exacte. Pour $n=15$, CPLEX a réussi à trouver un meilleur tour que l'heuristique pour deux problèmes (D15 et E15); la différence est de un kilomètre. Il semble évident que plus la taille des problèmes augmente, plus l'heuristique risque d'être moins performante que CPLEX. Dans notre cas, les tailles des problèmes étant relativement petites, l'heuristique demeure un choix approprié comme méthode de résolution.

Pour le travailleur autonome, l'heuristique représente donc une alternative intéressante puisqu'elle ne nécessite pas l'achat de logiciels coûteux, ni d'un ordinateur nécessitant un espace mémoire imposant. Dans la section suivante, nous présentons l'interface qui facilitera l'utilisation de cette approche heuristique pour résoudre le problème de distribution pour un travailleur autonome.

6. Présentation de l'interface informatique

L'interface que nous avons utilisée pour résoudre notre problème a été programmée en Delphi. Elle constitue une première ébauche qui demande à être raffinée mais qui est néanmoins tout à fait fonctionnelle. L'utilisateur doit évidemment entrer les données dans une matrice des distances entre les clients. Cela se fait en entrant, un à la fois, les numéros associés aux clients de départ et d'arrivée et en indiquant dans la fenêtre de droite la distance entre les deux. Sur la figure 1, les nombres 24 et 57 des deux premières fenêtres du haut sont des numéros de clients et le nombre 9, à la droite, représente la distance entre les clients 24 et 57. Ces valeurs sont validées en appuyant sur « Ok ». Au fur et à mesure que les numéros des clients sont entrés, ils apparaissent dans la fenêtre du bas à gauche. On peut envoyer tous ces numéros dans la fenêtre du centre et laisser à l'heuristique le soin de choisir un tour initial pour l'ensemble des clients. On peut aussi sélectionner une partie des numéros si l'on désire établir une tournée pour quelques clients seulement. Il est possible également pour l'utilisateur de déterminer le tour initial de son choix. Une fois le tour initial déterminé, il suffit d'appuyer sur « GoAlgo » pour que le processus de résolution soit exécuté afin d'améliorer le tour initial. Lorsque le processus de résolution est complété, le tour trouvé et son coût (ou sa distance selon le contexte d'application) apparaissent au bas de l'écran. Le tour est représenté par la suite ordonnée des clients à visiter. Tout le processus de résolution ne prend que quelques fractions de secondes. Il est également possible pour l'utilisateur d'imposer une ou plusieurs arêtes.

L'interface que nous avons élaborée est donc très facile à utiliser pour une personne ayant une formation restreinte en informatique. Cette personne peut également tester différents scénarii de tournées, si elle le désire, et proposer une tournée de départ pour vérifier si elle peut être améliorée. Nous nous proposons, dans les prochains mois, d'améliorer l'aspect visuel et fonctionnel de cette interface pour la rendre encore plus attrayante et simple à utiliser.

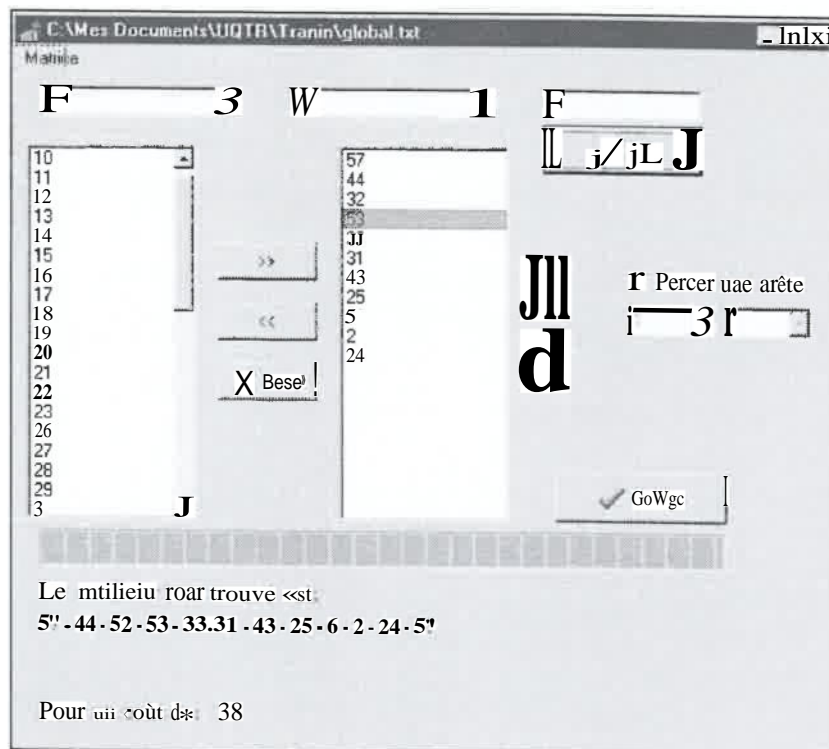


Figure 1 : Interface utilisateur.

7. Conclusion

Les travailleurs autonomes œuvrant dans le secteur de la distribution doivent réduire leurs coûts de fonctionnement s'ils veulent demeurer en affaire tout en étant concurrentiels. Ils disposent de peu de moyens financiers pour les aider en ce sens. Dans cet article, nous avons présenté une méthode simple pouvant aider un travailleur à déterminer les trajets quotidiens des visites de ses clients et ce, à un coût réduit. L'heuristique proposée accompagnée d'un outil informatisé simple d'utilisation convient à ce type de travailleur. Ils permettent d'améliorer la performance logistique du travailleur sans que cela ne soit trop coûteux. De plus, nous avons pu vérifier que nos résultats se comparent fort avantageusement aux solutions exactes pour des problèmes de petites tailles.

8. Bibliographie

- Gutin, G. (1999), «Exponential Neighbourhood Local Search for the Traveling Salesman Problem», *Computers and Operations Research* 26, N° 4, 313-320.
- Huang, C.P. Alidaee, B. et Johnson, J.D. (1999), «A Tour Construction Heuristic for the Traveling Salesman Problem», *The Journal of Operational Research Society* 50, N° 8, 797-809.
- Khan, W.A., Hayhurst, D.R. et Cannings, C. (1999), «Determination of Optimal Path under Approach and Exit Constraints», *EJOR* 117, No 2, 310-325.
- Lawler, E.L., Lenstra, J.K., Rinnooy Kan, A.H.G. et Shmoys, D.B. (1985), *The Traveling Salesman Problem: A Guided Tour of Combinatorial Optimization*, John Wiley and Sons, 473 p.
- Lin, S. et Kemighan, B.W. (1973), «An Effective Heuristic Algorithm for the Traveling Salesman Problem», *Oper. Res.* 21, 498-516.
- Pearn, W.L. et Chian, R.C. (1998), «Improved Solutions for the Traveling Purchaser Problem», *Computers and Operations Research* 25, N° 11, 879-885.

