



HAL
open science

PROBLÈME DE TOURNÉES DE VÉHICULE AVEC SYNCHRONISATION POUR L'ORGANISATION DE SOINS À DOMICILE

Fabrice Gayraud, Laurent Deroussi, Nathalie Grangeon, Sylvie Norre

► **To cite this version:**

Fabrice Gayraud, Laurent Deroussi, Nathalie Grangeon, Sylvie Norre. PROBLÈME DE TOURNÉES DE VÉHICULE AVEC SYNCHRONISATION POUR L'ORGANISATION DE SOINS À DOMICILE . MOSIM 2014, 10ème Conférence Francophone de Modélisation, Optimisation et Simulation, Nov 2014, Nancy, France. hal-01166617

HAL Id: hal-01166617

<https://hal.science/hal-01166617v1>

Submitted on 23 Jun 2015

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

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

Problème de tournées de véhicule avec synchronisation pour l'organisation de soins à domicile

Fabrice GAYRAUD, Laurent DEROUSSE, Nathalie GRANGEON, Sylvie NORRE

LIMOS UMR CNRS 6158 Clermont-Ferrand
Antenne de l'IUT d'Allier - Avenue Aristide Briand CS 82235
03101 MONTLUCON Cedex - France
{fagayraud, deroussi, grangeon, norre}@moniu.univ-bpclermont.fr

RÉSUMÉ : *Ce papier traite d'un problème de tournées de véhicules avec des contraintes de synchronisation et d'une application dans le cadre d'organisation de soins à domicile. Nous proposons une modélisation mathématique basée sur le m-TSPTW avec des contraintes spécifiques comme la synchronisation d'activités ou la préférence des patients et une méthode de résolution à l'aide d'une métaheuristique que nous testons sur des instances de la littérature.*

MOTS-CLÉS : *soins à domicile, tournées de véhicules, synchronisation, modélisation mathématique, métaheuristique.*

1 INTRODUCTION

Nous nous intéressons à deux types de structure qui réalisent des soins à domicile, les Services de Soins Infirmiers À Domicile (SSIAD) et les services d'Hospitalisation À Domicile (HAD). Les SSIAD sont des établissements sociaux et médico-sociaux et ont pour objectif de maintenir le plus longtemps possible l'autonomie des patients à leur domicile et d'aider les personnes dépendantes à mieux vivre au quotidien. En revanche les services de HAD sont des structures de soins alternatives à l'hospitalisation qui permettent d'assurer au domicile du patient des soins médicaux et paramédicaux importants pour une durée limitée mais renouvelable en fonction de l'évolution de l'état de santé du patient. L'objectif d'un service de HAD est d'éviter voire de raccourcir une hospitalisation classique en établissement afin d'améliorer le confort des patients et de baisser les coûts de fonctionnement des hôpitaux. Nous débutons par une présentation du contexte de nos travaux et la présentation de notre problème d'optimisation. Nous poursuivons avec un état de l'art sur l'organisation de soins à domicile. Nous proposons ensuite une modélisation mathématique du problème basée sur un modèle de m-TSPTW puis une métaheuristique que nous testons sur des instances de la littérature.

2 CONTEXTE ET PRÉSENTATION DU PROBLÈME

Les SSIAD sont régis par le décret n°2007-793 du 9 mai 2007 - art. 4 JORF 11 mai 2007. Ils assurent, sur prescription médicale, des prestations de soins in-

firmiers sous la forme de soins techniques ou de soins de base et relationnels, auprès de personnes âgées de soixante ans et plus, malades ou dépendantes ; de personnes adultes de moins de soixante ans présentant un handicap ; de personnes adultes de moins de soixante ans atteintes de pathologies chroniques ou présentant une affection. Ces services interviennent à domicile ou dans les établissements non médicalisés pour personnes âgées et pour personnes adultes handicapées. Le service de soins infirmiers à domicile doit comprendre un infirmier coordonnateur qui a pour fonction :

- l'accueil des personnes et de leur entourage;
- l'évaluation des besoins de soins de ces personnes au moyen de visites à leur domicile, afin d'élaborer et de mettre en œuvre les projets individualisés de soins ;
- la coordination des professionnels (médecins, infirmières, aides-soignantes, kinésithérapeutes, ...).

Les conditions générales d'admission des patients dans un service de HAD sont différentes. En effet, peut être admis en HAD un patient qui est déjà hospitalisé et dont le médecin estime que les soins peuvent être poursuivis à domicile, ou un patient qui n'est pas hospitalisé mais dont le médecin estime que son état ne nécessite pas un séjour à l'hôpital. Les critères d'âge, de dépendance ou de handicap n'entrent pas en ligne de compte. Il est cependant nécessaire que certaines conditions soient remplies. Le logement du patient doit être compatible avec une hospitalisation à domicile, une enquête est parfois nécessaire. Il faut que les soins concernent des patients ayant des

pathologies évolutives sur une durée non déterminée au préalable ou que cela concerne des soins de réadaptation au domicile après la phase aiguë d'une pathologie. Dix-sept modes de prise en charge sont définis, nous pouvons citer par exemple l'assistance respiratoire, la chimiothérapie, l'éducation du patient et de son entourage, ... Un patient peut être suivi pour plusieurs prises en charge.

Quel que soit le type de structure, les soins au domicile des patients sont réalisés par des médecins, infirmiers, aides-soignants, kinésithérapeutes, ... Nous souhaitons proposer un outil d'aide à la décision afin d'organiser les tournées des personnels de soins de manière à ce qu'elles satisfassent au mieux un ensemble de contraintes.

Un ou plusieurs soins sont réalisés par un ou plusieurs professionnels au domicile d'un patient lors d'une même visite. Chaque soin est caractérisé par sa durée qui dépend du niveau de dépendance du patient. Le niveau de dépendance est un entier (compris entre 1 et 4) déterminé à partir de la grille nationale Autonomie Gérontologie Groupes Iso Ressources. Au niveau 1, le patient est confiné au lit ou au fauteuil. En revanche, au niveau 4, le patient peut se déplacer seul mais a besoin d'aide pour la toilette et le ménage. Un patient est également défini par son lieu de résidence et une fenêtre de temps de disponibilité pour recevoir les soins. Il peut exprimer des préférences pour être soigné par un professionnel plutôt qu'un autre. Nous appellerons ressource un professionnel appartenant à la structure de soins. Une ressource a un type (médecin, infirmier, aide-soignant, kinésithérapeute, ...), un planning de travail, un niveau d'expérience pour réaliser chaque soin. Les différentes ressources doivent réaliser des tournées équilibrées.

L'objectif est de répartir et ordonner les soins entre les différentes ressources afin de construire les tournées en s'attachant à :

- minimiser la distance parcourue par les ressources ;
- répartir équitablement les patients de même niveau de dépendance entre les tournées ;
- maximiser la satisfaction des patients en leur affectant au mieux les ressources souhaitées ou maximiser le niveau d'expérience des ressources affectées aux patients.

Les contraintes identifiées sont les suivantes : respecter les disponibilités des patients et le planning des ressources, respecter le nombre et le type de ressources nécessaires pour réaliser chaque activité, tenir compte des temps de transport entre les domiciles des patients. Les tournées des ressources doivent débuter et se terminer au dépôt (centre hospitalier, SSIAD, ...). Enfin, il faut tenir compte du temps de

transport entre les domiciles des patients. Ce type de structure a fait l'objet de plusieurs travaux que nous présentons dans la partie suivante.

3 ÉTAT DE L'ART

Nous avons étudié les modèles de la littérature relatifs aux soins à domicile. Nous en avons ressorti un ensemble de caractéristiques que nous avons synthétisées dans trois tableaux. Le tableau 1 résume les caractéristiques en relation avec les ressources, le tableau 2 les caractéristiques liées au patient. Enfin le tableau 3 recense les critères considérés. Au préalable, nous allons décrire les termes utilisés.

3.1 Caractéristiques liées aux ressources

- **type de ressources** : chaque ressource appartient à une catégorie des personnels soignants (médecin, infirmier, kinésithérapeute, ...) ;
- **préférence des patients en matière de ressources** : les patients définissent des priorités entre les ressources qui peuvent effectuer leurs soins ;
- **disponibilité des ressources** : les ressources sont soumises à des plannings de travail ;
- **pause déjeuner** : l'organisation des activités de chaque ressource intègre une pause dans la journée ;
- **ressource régulière** : si un patient reçoit plusieurs soins à différents moments de la période, il faut favoriser le fait que ce soit toujours la même ressource qui les réalise ;
- **mode de transport** : un ensemble de moyens de transport sont disponibles pour réaliser les tournées de soins comme les transports en commun, le vélo, la voiture, ...

3.2 Caractéristiques liées aux patients

- **disponibilité des patients** : définition d'une période de la journée pendant laquelle le patient est à son domicile pour recevoir les soins ;
- **une ou plusieurs visites** : un patient peut recevoir plusieurs visites ;
- **niveau de dépendance** : prise en compte du niveau de dépendance lors de la construction des tournées ;
- **précédence entre activités** : les soins réalisés chez un patient nécessitent d'être réalisés dans un ordre défini ;
- **synchronisation** : un ou plusieurs soins nécessitent au moins deux ressources pour être réalisée chez un patient.

	Type de ressources	Préférence	Disponibilité des ressources	Pause déjeuner	Ressource régulière	Mode de transport
(Begur et al. 1997)	X					
(Cheng & Rich 1998)			X	X		
(De Angelis 1998)						
(Bertels & Fahle 2006)	X	X	X		X	X
(Borsani et al. 2006)	X				X	
(Thomsen 2006)	X			X	X	
(Eveborn et al. 2006)	X	X		X	X	
(Akjiratikarl et al. 2007)			X			
(Bredström & Rönnqvist 2008)		X				
(Ben Bachouch et al. 2010)	X	X	X	X	X	
(Kergosien et al. 2009)	X		X			
(Rasmussen et al. 2012)	X		X			X
(Redjem et al. 2012)						

Tableau 1 – Caractéristiques liées aux ressources dans les modèles de la littérature

	Disponibilité des patients	Une ou plusieurs visites	Niveau de Dépendance	Précédence entre activités	Synchronisation
(Begur et al. 1997)		X			
(Cheng & Rich 1998)	X				
(De Angelis 1998)					
(Bertels & Fahle 2006)	X				
(Borsani et al. 2006)	X	X			
(Thomsen 2006)	X	X			X
(Eveborn et al. 2006)	X	X		X	X
(Akjiratikarl et al. 2007)	X				
(Bredström & Rönnqvist 2008)	X	X		X	X
(Ben Bachouch et al. 2010)	X	X			X
(Kergosien et al. 2009)	X			X	X
(Rasmussen et al. 2012)	X			X	
(Redjem et al. 2012)	X				X

Tableau 2 – Caractéristiques liées aux patients dans les modèles de la littérature

	Coût de transport	Coûts des heures de travail	Nombre de visites	Équilibrage	Temps d'attente	Date de début des activités	Préférence des patients
(Begur et al. 1997)	X						
(Cheng & Rich 1998)		X					
(De Angelis 1998)			X				
(Bertels & Fahle 2006)	X						
(Borsani et al. 2006)				X			
(Thomsen 2006)	X		X				
(Eveborn et al. 2006)	X						
(Akjiratikarl et al. 2007)	X						
(Ben Bachouch et al. 2010)	X						
(Bredström & Rönnqvist 2008)	X			X	X		X
(Kergosien et al. 2009)	X						
(Rasmussen et al. 2012)	X		X				X
(Redjem et al. 2012)	X				X	X	

Tableau 3 – Critères considérés dans les modèles de la littérature

3.3 Critères

- **coût de transport** : durée (ou distance) de transport effectuée par les ressources ;
- **coût des heures de travail** : surcoût engendré par le dépassement des planning de travail des ressources ;
- **nombre de visites** : il faut rencontrer le plus de patients possibles parmi un ensemble de patients à soigner pendant une période de temps définie ;
- **équilibre** : charge de travail équivalente entre les tournées de chaque ressource. Le critère à équilibrer diffère d'un papier à l'autre : nombre d'activités, durées totales des activités réalisées par chaque ressource ;
- **temps d'attente** : attente des ressources avant le début des soins ;
- **date de début des activités** : réalisation des activités au plus tôt ;
- **préférence des patients** : satisfaire au mieux les préférences exprimées par les patients.

Dans la littérature, la majorité des méthodes de résolution sont basées sur des méthodes exactes comme le soulignent (Affi et al. 2013). Nous constatons que les caractéristiques du problème que nous souhaitons traiter sont présentes dans de nombreux modèles de la littérature à l'exception de la prise en compte du niveau de dépendance des patients ou l'expérience des ressources. Concernant les critères, peu de papiers traitent de problèmes multi-objectif. Nous pouvons citer (Bredström & Rönnqvist 2008) ou (Rasmussen et al. 2012). Ces deux papiers proposent deux méthodes différentes pour la résolution d'un même modèle. Le modèle est proche du problème que nous souhaitons traiter, cependant il n'intègre pas les niveaux de dépendance des patients, de plus l'équilibre est lié au temps de travail des ressources et non au niveau de dépendance.

4 MODÉLISATION MATHÉMATIQUE

Nous avons réalisé un programme linéaire pour l'organisation des activités de soins à domicile basé sur le modèle du m-TSPTW. Le modèle de base est complété avec les contraintes et les objectifs spécifiques à notre problème. Une activité regroupe un ou plusieurs soins réalisés au même moment par les mêmes ressources chez le même patient. Nous allons préciser un point concernant le degré de compatibilité qui permet de modéliser différents aspects de notre problème :

- le type de ressource
- la préférence du patient ou l'expérience des ressources

Ce degré est un réel compris entre 0 et 1. Concernant le type de ressource, si le degré est égal à 0,

la ressource ne peut pas réaliser l'activité, sinon elle peut la réaliser. Pour illustrer ce point, nous pouvons nous référer au tableau 4. Les ressources r_1 et r_2 sont de type infirmier et les ressources r_3 et r_4 de type aide-soignant. Les ressources doivent réaliser les activités a_1 , a_2 et a_3 . Les degrés de compatibilité entre les ressources de type infirmier (r_1 , r_2) et l'activité a_2 sont nuls, par conséquent les infirmiers ne peuvent pas réaliser cette activité. À l'inverse, les degrés de compatibilité entre les ressources de type aide-soignant (r_3 , r_4) et l'activité a_2 sont strictement positifs par conséquent les aide-soignants peuvent réaliser cette activité. Ensuite nous pouvons modéliser, soit la préférence du patient, soit l'expérience de la ressource pour réaliser une activité, mais pas les deux simultanément. Dans le premier cas, plus le degré de compatibilité est proche de 1, plus la préférence pour la ressource est importante. Dans l'exemple du tableau 4, si nous considérons l'activité a_3 , nous constatons que les 4 ressources peuvent réaliser cette activité mais le patient préfère la ressource r_3 car le degré est le plus élevé (0,9). Dans le second cas, plus le degré de compatibilité est proche de 1, plus la ressource a de l'expérience pour réaliser l'activité. En reprenant l'exemple du tableau 4, nous constatons que la ressource de type infirmier r_1 a plus d'expérience que la ressource de type infirmier r_2 pour réaliser l'activité a_1 ($0,9 > 0,2$). La modélisation proposée permet l'affectation de ressources du type souhaité pour les activités qui nécessitent une ressource ou deux ressources de même type. En revanche, il ne permet pas d'assurer l'affectation de deux ressources de type différent à une activité synchronisée.

		a_1	a_2	a_3
Infirmier	r_1	0.9	0	0.5
	r_2	0.2	0	0.2
Aide-soignant	r_3	0	0.1	0.9
	r_4	0	1	0.1

Tableau 4 – Exemple - degré de compatibilité

4.1 Les données

Soient $R = \{1, \dots, n_R\}$ l'ensemble des ressources disponibles, $A = \{1, \dots, n_A\} \cup \{0, n_{A+1}\}$ l'ensemble des activités à réaliser où les activités 0 et n_{A+1} sont des activités fictives de début et fin de tournée. Elles ont une durée de 0 et nécessitent n_R ressources.

nb_i Nombre de ressources requises pour réaliser l'activité $i \in A$

τ_i Durée de l'activité $i \in A$

$[b_i, e_i]$ Fenêtre de temps pour réaliser l'activité $i \in A$

η_i Niveau de dépendance du patient qui reçoit l'activité $i \in A$

D_{ij} Temps de transport entre l'activité $i \in \{0, \dots, n_A\}$ et l'activité $j \in \{1, \dots, n_{A+1}\}$

C_{jk} Degré de compatibilité entre l'activité $j \in A$ et la ressource $k \in R$

M est une grande valeur.

4.2 Les variables

Nous devons déterminer la liste ordonnée des activités à réaliser par chacune des ressources ainsi que la date de début des activités.

Ainsi, nous utilisons les variables suivantes :

$$\begin{aligned} x_{ijk} &= 1 \text{ si la ressource } k \in R \text{ effectue l'activité} \\ &\quad i \in \{0, \dots, n_A\} \text{ avant l'activité } j \in \{1, \dots, n_{A+1}\} \\ &= 0 \text{ sinon} \\ z_i &\text{ date de début de réalisation de l'activité} \\ &\quad i \in \{0, n_{A+1}\} \end{aligned}$$

4.3 Premier Modèle

4.3.1 Les contraintes

Pour répondre au problème présenté, nous devons satisfaire les contraintes suivantes :

$$\sum_{j=1}^{n_A+1} \sum_{k=1}^{n_R} x_{ijk} = nb_i, \forall i \in \{1, \dots, n_A\} \quad (1)$$

$$\sum_{i=0}^{n_A} \sum_{k=1}^{n_R} x_{ijk} = nb_j, \forall j \in \{1, \dots, n_A\} \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^{n_A} x_{0jk} = 1, \forall k \in R \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^{n_A} x_{i(n_A+1)k} = 1, \forall k \in R \quad (4)$$

$$\sum_{i=0}^{n_A} x_{ilk} = \sum_{j=1}^{n_A+1} x_{ljk}, \forall l \in \{1, \dots, n_A\}, \forall k \in R \quad (5)$$

$$z_j \geq z_i + \tau_i + D_{ij} + (x_{ijk} - 1) \cdot M, \quad (6)$$

$$\forall i \in \{0, \dots, n_A\}, \forall j \in \{1, \dots, n_A + 1\}, \forall k \in R$$

$$z_i \geq b_i, \forall i \in \{1, \dots, n_A + 1\} \quad (7)$$

$$z_i \leq e_i - \tau_i, \forall i \in \{1, n_A + 1\} \quad (8)$$

$$\sum_{i=0}^{n_A} x_{ijk} \leq C_{jk} \cdot M, \forall j \in \{1, \dots, n_A\}, \forall k \in R \quad (9)$$

$$\sum_{i=0}^{n_A} \sum_{j=1}^{n_A+1} x_{ijk} \cdot \eta_i \leq \delta, \forall k \in R \quad (10)$$

Les contraintes (1) et (2) vérifient le respect du nombre de ressources pour réaliser chaque activité. Les contraintes (3) (respectivement (4)) imposent que les tournées débutent (respectivement se terminent) au dépôt. Les contraintes (5) assurent la conservation des flux. Les contraintes (6) vérifient que le temps de transport entre les activités est pris en compte. Les contraintes (7) et (8) imposent que les activités soient réalisées pendant la fenêtre de temps de disponibilité des patients. La compatibilité ressource(s)/activité est respectée selon les contraintes (9). La contrainte (10) détermine δ , une borne supérieure du niveau de dépendance global des tournées. Le niveau global de dépendance d'une tournée est la somme des niveaux de dépendance de chaque patient visité sur la tournée.

4.3.2 Les objectifs

- la distance totale parcourue T

$$T = \sum_{i=0}^{n_A} \sum_{j=1}^{n_A+1} D_{ij} \sum_{k=1}^{n_R} x_{ijk} \quad (11)$$

- la satisfaction des patients ou le niveau d'expérience pour la réalisation des activités

$$C = \sum_{j=1}^{n_A} \sum_{k=1}^{n_R} (1 - C_{jk}) \sum_{i=0}^{n_A+1} x_{ijk} \quad (12)$$

- le niveau de dépendance des tournées δ

La fonction objectif à minimiser sera la somme des critères T , δ et C pondérée par les coefficients α_1 , α_2 et α_3 .

$$\min \alpha_1 \cdot T + \alpha_2 \cdot \delta + \alpha_3 \cdot C \quad (13)$$

4.4 Second modèle

Dans un premier temps, nous avons considéré l'équilibrage comme un objectif en minimisant la tournée qui a un niveau de dépendance global maximum. Dans un second temps, nous avons intégré l'équilibrage comme une contrainte, on tolère un écart, que nous noterons ϵ , entre le niveau global de dépendance de la tournée de chacune des ressources. Les tournées seront considérées comme équilibrées si la différence entre le niveau global maximum et minimum est inférieur à la tolérance souhaitée ϵ . Nous ajoutons la donnée ϵ aux données utilisées dans le modèle 1. Les contraintes (1), (2), (3), (4), (5), (6), (7), (8) et (9) sont conservées. En revanche, la contrainte (10) est remplacée par la contrainte (14).

$$\max_{k \in R} \left(\sum_{i=0}^{n_A} \sum_{j=1}^{n_A+1} \eta_i \cdot x_{ijk} \right) - \min_{k \in R} \left(\sum_{i=0}^{n_A} \sum_{j=1}^{n_A+1} \eta_i \cdot x_{ijk} \right) \leq \epsilon \quad (14)$$

La fonction objectif (13) est remplacée par la somme des critères T et C pondérée par les critères α_1 et α_3 .

$$\min \alpha_1 \cdot T + \alpha_3 \cdot C \quad (15)$$

Ainsi nous pouvons travailler sur l'optimisation d'un modèle bi-critère.

5 MÉTHODE APPROCHÉ

Nous avons choisi de travailler avec des méthodes approchées de type métaheuristique en débutant par une recherche locale itérée. Les hypothèses considérées sont identiques à celle de la modélisation mathématique. L'algorithme 1 décrit la méthode proposée par (Lourenço et al. 2003). Nous aborderons les points suivants : le codage d'une solution, les voisinages utilisés (*Perturbation* et *LocalSearch*), la construction d'une solution initiale (*GenerateInitialSolution*), l'évaluation d'une solution (faisabilité et critères) et les critères d'acceptation (*AcceptanceCriterion*) de la recherche locale itérée. Nous n'utiliserons pas d'historique.

Algorithme 1 : Recherche locale itérée

$s_0 = \text{GenerateInitialSolution}$
 $s^* = \text{LocalSearch}(s_0)$
repeat
 $s' = \text{Perturbation}(s^*, \text{history})$
 $s^{*'} = \text{LocalSearch}(s')$
 $s^* = \text{AcceptanceCriterion}(s^{*'}, s', \text{history})$
until *termination condition*

5.1 Codage d'une solution

Une solution est codée à l'aide d'une matrice $\phi = (\phi_{ik})_{A \times R}$ où ϕ_{ik} est la i^{eme} activité réalisée par la ressource k . Ainsi, chaque colonne de la matrice est la liste ordonnée des activités à réaliser par une ressource. Elle peut-être représentée sous la forme d'un graphe. Dans la figure 1, nous donnons un exemple du codage et de la représentation pour une solution à 3 ressources et 10 activités. Toutes les activités nécessitent une ressource à l'exception des activités 3, 5 et 9 qui nécessitent la présence simultanée de deux ressources pour être réalisée. Toutes les activités peuvent être réalisées par chacune des ressources (degré de compatibilité strictement supérieur à 0) sauf l'activité 10 qui ne peut pas être réalisée par la ressource r_3 . La ressource r_1 part du dépôt pour réaliser l'activité 6, puis l'activité 4, etc. L'activité 5 est réalisée simultanément par les ressources r_1 et r_2 .

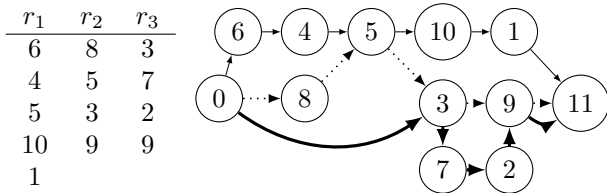


Figure 1 – Codage et représentation d'une solution

5.2 Systèmes de voisinage

Nous utilisons deux systèmes de voisinage : insertion et permutation. Ils ont été définis par (Liu et al. 2010). Ils sont utilisés dans la phase *LocalSearch* (intensification) et dans la phase *Perturbation* (diversification).

Le voisinage insertion, décrit dans l'algorithme 2, consiste à déplacer une activité à une place différente en respectant la compatibilité entre ressource et activité mais sans tenir compte des fenêtres de temps. Les mouvements autorisés sont de deux types :

- les mouvements intra-tournée (une activité est insérée à une place différente dans la tournée de la même ressource) cf. figure 2 a.
- les mouvements inter-tournées (une activité est insérée dans la tournée d'une autre ressource) cf. figure 2 b. (Sur l'exemple, l'activité 10 ne peut pas

Algorithme 2 : Voisinage insertion

1. choisir aléatoirement et uniformément une ressource k_1
 2. choisir aléatoirement et uniformément une activité i réalisée par la ressource k_1
 3. choisir aléatoirement et uniformément une ressource k_2 compatible avec l'activité i
 4. choisir aléatoirement et uniformément une position b dans la liste ordonnée d'activités réalisée par la ressource k_2
 5. insérer l'activité i à la position b dans la liste ordonnée d'activités réalisées par la ressource k_2
-

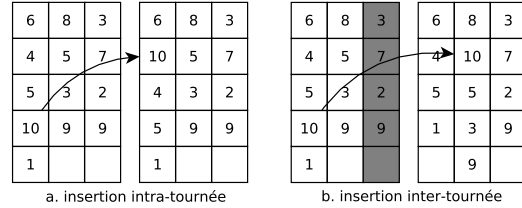


Figure 2 – Voisinage insertion

être insérée dans la tournée de la ressource 3 car elle n'est pas compatible avec cette ressource).

Le voisinage permutation, décrit dans l'algorithme 3, consiste à échanger deux activités entre elles en respectant la compatibilité entre ressource et activité mais sans tenir compte des fenêtres de temps. De

Algorithme 3 : Voisinage permutation

1. choisir aléatoirement et uniformément une ressource k_1
 2. choisir aléatoirement et uniformément une activité i réalisée par la ressource k_1
 3. choisir aléatoirement et uniformément une ressource k_2 compatible avec l'activité i , la ressource k_2 doit effectuer au moins une activité compatible avec la ressource k_1
 4. choisir aléatoirement et uniformément une activité j compatible avec la ressource k_1 réalisée par la ressource k_2
 5. échanger les activités i et j
-

la même façon que pour le voisinage insertion, nous autorisons des mouvements intra-tournée et inter-tournées. Les deux mouvements sont illustrés dans la figure 3.

5.3 Heuristique de construction

Pour initialiser la recherche locale itérée, nous appliquons une heuristique gloutonne dont l'algorithme de principe est décrit dans l'algorithme 4. La solution construite respecte la compatibilité entre activité et ressource, le nombre de ressources nécessaires pour réaliser les activités, en revanche nous relaxons les contraintes de fenêtres de temps et d'équilibrage. L'équation (16) permet de calculer la date de début

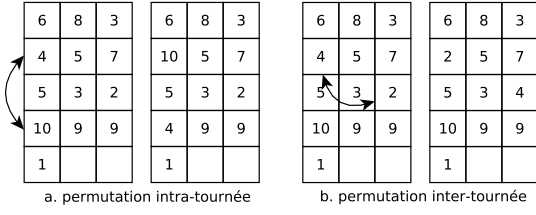


Figure 3 – Voisinage permutation

Algorithme 4 : Heuristique de construction

```

initialiser  $z_0 = 0$ 
trier les activités suivant la borne supérieure de la
fenêtre de temps croissante
for chaque activité  $i \in \{1, \dots, n_A\}$  selon l'ordre
précédent do
    for chaque ressource  $k \in R$  compatible avec
    l'activité  $i$  do
        calculer la date de fin de l'activité  $i$  réalisée
        par la ressource  $k$ 
    end
    Affecter l'activité  $i$  aux  $nb_i$  ressource(s) qui
    minimise la date de fin de l'activité
end
    
```

de l'activité i .

$$z_{\phi_{ik}} = z_{\phi_{(i-1)k}} + \tau_{i-1} + D_{\phi_{(i-1)k}\phi_{ik}} \quad (16)$$

5.4 Évaluation d'une solution

Lors de l'application d'un système de voisinage, il est possible de créer un cycle dans le graphe qui représente la solution. Dans ce cas, la solution n'est pas réalisable. Si nous reprenons l'exemple de solution de la figure 1 et que nous appliquons le voisinage permutation sur la première activité réalisée par la ressource 1 et la première activité réalisée par la ressource 3, on obtient la solution décrite dans la figure 4. Nous constatons l'apparition d'un cycle dans la solution entre les activités 3, 4 et 5. Après la vérification de l'absence de cycle, nous utilisons un algorithme de plus long chemin pour calculer les dates de début des activités.

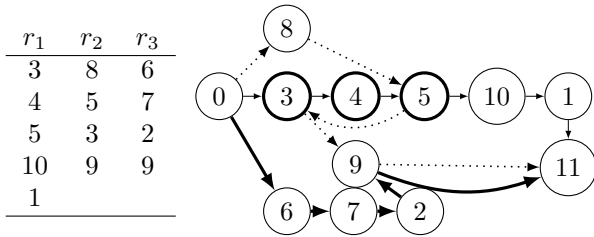


Figure 4 – Solution avec un cycle

Nous avons relaxé les contraintes de fenêtres de temps pour la construction de la solution initiale. Par conséquent, la fonction objectif est toujours la somme pondérée des trois critères définis dans la partie 4.3.2 à laquelle nous ajoutons des pénalités liées au non respect des fenêtre de temps (17)

$$PTW = \sum_{i=1}^{n_A} (z(i) - e_i) \quad (17)$$

Nous en déduisons la fonction objectif (20)

$$\alpha_1.T + \alpha_2.\delta + \alpha_3.C + \beta_1.PTW \quad (18)$$

où $(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$ sont les coefficients de pondération et β_1 un coefficient de pénalité.

Pour la deuxième approche, nous procédons de la même manière avec la recherche locale itérée que dans le modèle mathématique en introduisant des pénalités si la contrainte (14) n'est pas respectée. L'équation (19) donne l'évaluation des pénalités appliquées.

$$PE = \max \left(\left[\max_{k \in R} \left(\sum_{i=0}^{n_A} \sum_{j=1}^{n_{A+1}} \eta_i \cdot x_{ijk} \right) - \min_{k \in R} \left(\sum_{i=0}^{n_A} \sum_{j=1}^{n_{A+1}} \eta_i \cdot x_{ijk} \right) \right], \epsilon \right) - \epsilon \quad (19)$$

La fonction objectif devient :

$$\alpha_1.T + \alpha_3.C + \beta_1.PTW + \beta_2.PE \quad (20)$$

où (α_1, α_3) sont les coefficients de pondération et (β_1, β_2) les coefficients de pénalité.

5.5 Critères d'acceptation

Cela correspond à la phase *AcceptanceCriterion* de l'algorithme 1. Le premier choix consiste à appliquer la perturbation sur la solution de la recherche locale en cours, nommée Random Walk (*RW*) par (Lourenço et al. 2003). La diversification est alors très importante. La seconde possibilité privilégie l'intensification en appliquant la perturbation à la solution record, critère appelé Better Walk (*BW*) par (Lourenço et al. 2003). Enfin, nous avons également utilisé une solution intermédiaire qui consiste à faire le choix d'appliquer la perturbation sur la solution de la recherche locale en cours plutôt que la solution record suivant une probabilité. Nous la noterons Metropolis Walk (*MW*). Cette probabilité est définie par la dynamique de Metropolis. La méthode proposée est alors une hybridation entre une recherche locale itérée et un recuit simulé.

6 RÉSULTATS

Nous avons testé nos propositions sur une instance générée aléatoirement composée de 30 activités dont 7 qui nécessitent 2 ressources et quatre ressources de deux types (2 ressources de chaque type). Les temps de calcul avec le solveur CPLEX sont limités à 1 heure. Les critères sont hiérarchisés. Le tableau 5 résume les résultats obtenus avec la méthode 1. Les trois premières colonnes du tableau indiquent pour chaque ligne le niveau de priorité de chacun des

Critères			Objectif				Gap (%)	Temps CPU
T	C	δ	T	C	δ_{min}	δ_{max}		
1	3	2	87	18,1	13	28	-	4min40
1	2	3	87	17,6	13	33	-	1min57
3	2	1	181	13,7	20	21	0.9%	60min
2	3	1	103	17,2	20	21	-	2min30
2	1	3	154	12,7	13	28	9.76%	60min
3	1	2	150	12,7	13	26	11.02%	60min

Tableau 5 – Résultats PLNE - premier modèle

Critères			Objectifs				GAP (%)	Tps CPU
T	C	δ	T	C	δ_{min}	δ_{max}		
$\epsilon = 1$								
1	2		103	17,1	20	21	-	1min33
2	1		176	13,7	20	21	13,72%	60min
$\epsilon = 2$								
1	2		102	17,2	20	22	-	1min14
2	1		177	13,7	20	21	13,83%	60min
$\epsilon = 3$								
1	2		101	16,1	19	22	-	3min47
2	1		159	13,4	19	22	12,89%	60min
$\epsilon = 4$								
1	2		96	16	18	22	-	0min47
2	1		173	13,4	21	23	14,90%	60min

Tableau 6 – Résultats PLNE - second modèle

critères, la valeur 1 définit le critère prioritaire. Les colonnes "objectif" renseignent la valeur de chacun des critères. Si une solution optimale n'est pas atteinte en une heure, nous indiquons le gap (écart entre la borne inférieure et la borne supérieure). Enfin la dernière colonne indique les temps de calcul. En premier lieu, nous constatons que nous obtenons une solution optimale dans 3 cas (ligne 1, 2 et 4) et que dans le cas 3 nous obtenons une valeur très proche de l'optimal. Lorsque la préférence du patient est le critère prioritaire, nous obtenons un gap autour de 10%. Nous constatons également que les valeurs des critères non prioritaires sont de moins bonne qualité. En particulier pour l'équilibrage où l'écart entre la tournée au niveau de dépendance maximum et minimum est compris entre 13 et 20. Cette constatation nous a conduit à concevoir le second modèle présenté dans la partie 4.4. Nous avons testé 4 valeurs pour ϵ : 1, 2, 3 et 4. Les résultats obtenus sont dans le tableau 6. Nous constatons que les résultats obtenus sont similaires à ceux du modèle 1 dans le cas où la dépendance est prioritaire. De plus, le modèle trouve des solutions quel que soit le critère prioritaire avec un gap autour de 13% pour lorsque C est le critère prioritaire. Les valeurs des 2 critères sont moins bonnes qu'avec le modèle 1 car le problème est plus contraint. De la même manière que pour le modèle 1, nous ne trouvons pas de solution optimale en 60 minutes lorsque le critère principal est la compatibilité.

Nous avons testé la recherche locale itérée sur cette instance avec les trois critères d'acceptation décrits dans la configuration du modèle 1. Cinq répliques de 10^6 itérations ont été réalisées. À chaque itéra-

tion, le voisinage appliqué est choisi avec une probabilité de $\frac{2}{3}$ pour l'insertion, et $\frac{1}{3}$ pour la permutation. Ces probabilités ont été choisies car le cardinal de l'insertion ($n_A \cdot (n_A - 1)$) est le double de celui de la permutation ($\frac{n_A \cdot (n_A - 1)}{2}$). La *perturbation* est appliquée après 500 itérations sans amélioration. Pour cela, nous appliquons quatre fois le voisinage permutation. Les résultats sont renseignés dans le tableau 7. Pour chaque critère, nous avons calculé la valeur moyenne sur les cinq répliques et l'écart-type et cela est noté sous la forme *moyenne/ecart - type* dans le tableau. Nous constatons que le critère d'acceptation *MW* donne de meilleurs résultats. En revanche, lorsque la résolution exacte ne donne pas la solution optimale en une heure, la méthode approchée donne de meilleurs résultats. Dans tous les cas, les temps d'exécution sont inférieurs avec la méthode approchée car nous obtenons des résultats au bout de 15s. Les résultats avec le modèle 2 sont en cours de tests. Nous avons également testé notre méthode sur les instances décrites par (Bredström & Rönnqvist 2008) pour éprouver notre méthode. La taille des instances est décrite dans le tableau 8. Pour

Instances	Activités	Ressources	Activités synchronisées
1 à 5	18	4	2
6 à 8	45	10	5
9 à 10	72	16	8

Tableau 8 – Instances de (Bredstrom et al., 2008)

chacune des dix instances, cinq variantes sont proposées suivant la longueur des fenêtres de temps de disponibilité des patients : F (la date de chaque activité est fixée), S (petite), M (medium), L (grande) et A (pas de contraintes de fenêtre de temps). Nous avons utilisé le voisinage insertion uniquement car il donne de meilleurs résultats pour la partie intensification, la diversification est réalisée en appliquant 4 fois le voisinage permutation. Nous travaillons sur un million d'itérations, la diversification est appliquée suite à 500 itérations sans amélioration pour les instances à 18 activités. Nous avons réalisé cinq répliques pour chaque instance avec les critères d'acceptation *RW*, *BW* et *MW*.

Les critères sont similaires à ceux que nous étudions, la durée des tournées, la préférence des patients et l'équilibrage des tournées. Cependant deux points diffèrent. Sur les petites instances, (Bredström & Rönnqvist 2008) traitent les critères indépendamment les uns des autres et l'équilibrage ne se fait pas sur le niveau de dépendance (non considéré dans leur modèle) mais sur la durée des activités réalisées par chaque ressource. Pour les instances moyennes et grandes (6 à 10) les auteurs somment le critère durée de tournées et le critère équilibrage. Par conséquent, nous avons modifié notre méthode afin de travailler sur les mêmes critères pour pouvoir faire des comparaisons. La préférence entre un patient et une

Critères			RW				BW				MW			
T	δ	C	T	δ_{min}	δ_{max}	C	T	δ_{min}	δ_{max}	C	T	δ_{min}	δ_{max}	C
1	2	3	106/1,9	9,6/2,5	32/3,8	18,8/0,7	102/0,8	7/4,3	32/3	17,6/0,9	101/1,5	6,6/4,7	32/3,5	18,1/1,3
1	3	2	103/4,4	12/2	35/2,3	17,9/1	100/2,6	4/0	35/2,1	18/0,9	96/2,1	4,6/1,2	33/2,8	18/0,8
3	1	2	185/5,6	20/0	21/0	13,7/0	174/4,4	20/0	21/0	13,7/0	168/7,1	20/0	21/0	13,7/0
2	1	3	120/2,3	20/0	21/0	17,5/0,6	124/3,2	20/0	21/0	16,9/1	118/7,2	20/0	21/0	17,7/0,9
2	3	1	147/2,3	13/0	28/0	12,7/0	143/2,6	13/0	28/1,9	12,7/0	142/1,4	13/0	27,1/1	12,7/0
3	2	1	149/2,3	13/0	26/0	12,7/0	145/3,6	13/0	26/0	12,7/0	145/3,7	13/0	26/0	12,7/0

Tableau 7 – Résultat : Recherche locale itérée - Premier modèle

ressource est définie par un nombre réel compris entre -10 et 10 , plus la valeur est petite, plus la préférence est forte. Les tests ont été réalisés sur toutes les instances et avec l'ensemble des critères. Les résultats proposés dans ce papier concerne les petites instances et le critère de préférence du patient.

Les résultats sont synthétisés dans le tableau 9. La colonne *BK* est la meilleure solution connue, la colonne *Bred.* donne les résultats obtenus par la méthode heuristique basée sur la programmation linéaire proposée par (Bredström & Rönnqvist 2008) avec un temps d'exécution limité à 2 minutes et enfin les colonnes suivantes donnent les résultats que nous avons obtenus : moyenne (notée \bar{x}), écart-type (notée σ) et la meilleure solution (notée *BS*). Avec la recherche locale itérée, les temps d'exécution sont de 15 secondes pour 1 millions d'itérations. Les résultats notés avec une étoile correspondent à une solution optimale prouvée. Les résultats en gras concernent les instances où nous avons égalé ou amélioré la meilleure solution connue. Pour l'instance 4F, 3 des 5 répliques avec *RW* et 1 des 5 avec *MW* n'apportent pas de solutions qui respectent les disponibilités des patients, en revanche nous trouvons des solutions réalisables sur les 5 répliques avec *BW*. Plus généralement notre méthode n'est pas efficace sur les instances F ce qui peut s'expliquer par le fait que le problème est très contraint car les dates de début des activités sont fixées et les méthodes basées sur de la programmation linéaire donnent de meilleurs résultats. Nous constatons également que lorsque les fenêtres de temps ont une longueur non nulle, nous obtenons de bons résultats et nous améliorons certains résultats comme pour les instances 2A, 3A, 4L, 4A et 5A. De plus, les temps de calcul sont assez faibles puisqu'une réplique est réalisée en 15 secondes. Pour les autres critères considérés, nous trouvons des résultats analogues.

7 CONCLUSION

Nous avons présenté un modélisation mathématique pour traiter un problème d'organisation de soins à domicile. Ce modèle est une extension du m-TSPTW avec des contraintes spécifiques comme la synchronisation d'activités, la prise en compte du niveau de dépendance et les préférences des patients. Nous avons appliqué une méthode basée sur une

recherche locale itérée sur une instance que nous avons générée aléatoirement et sur les instances proposées par (Bredström & Rönnqvist 2008). Sur ces dernières, nous avons obtenu des résultats encourageants et amélioré certains résultats tout en limitant les temps d'exécution. En revanche, sur l'instance que nous avons construite les résultats de la recherche locale itérée sont assez éloignés de ceux obtenus avec la PLNE. Ceci peut s'expliquer par la part d'activités synchronisées plus importantes dans notre instance (23% contre 10% pour les instances de (Bredström & Rönnqvist 2008)) et la prise en compte des types de ressources. De plus, les systèmes de voisinages utilisés limitent les déplacements des activités synchronisées. Nous travaillons donc sur un codage de solution différents et par conséquent sur de nouveaux systèmes de voisinage pour approcher les résultats de la PLNE quel que soit le critère priorisé. Nous souhaitons également travailler sur l'approche multi-critère en utilisant un front de Pareto et une méta-heuristique à population.

References

- Affi, S., Dang, D.-C. & Moukrim, A. (2013). A simulated annealing algorithm for the vehicle routing problem with time windows and synchronization constraints, *Learning and Intelligent Optimization*, Springer, pp. 259 – 265.
- Akjiratikarl, C., Yenradee, P. & Drake, P. R. (2007). Pso-based algorithm for home care worker scheduling in the uk, *Computers & Industrial Engineering* **53**(4): 559 – 583.
- Begur, S. V., Miller, D. M. & Weaver, J. R. (1997). An integrated spatial dss for scheduling and routing home-health-care nurses, *Interfaces* **27**(4): 35 – 48.
- Ben Bachouch, R., Guinet, A. & Hajri-Gabouj, S. (2010). Comparaison de deux méthodes pour la planification des tournées des infirmiers dans une structure d'hospitalisation à domicile, *GISEH, Clermont-Ferrand*.
- Bertels, S. & Fahle, T. (2006). A hybrid setup for a hybrid scenario: combining heuristics for the home health care problem, *Computers & Operations Research* **33**(10): 2866 – 2890.

Inst.	BK	Bred.	nos résultats RW			nos résultats BW			nos résultats MW		
			\bar{x}	σ	BS	\bar{x}	σ	BS	\bar{x}	σ	BS
1F	-96,45*	-96,45	-73,40	7,42	-85,15	-87,21	8,80	-96,45	-87,08	6,59	-96,45
1S	-114,03*	-114,03	-108,24	1,90	-109,66	-112,32	1,41	-114,03	-112,64	1,18	-114,03
1M	-117,8*	-117,80	-115,05	2,99	-117,80	-117,47	0,65	-117,8	-117,8	0	-117,8
1L	-118,51*	-118,51	-117,90	0,91	-118,51	-118,51	0	-118,51	-118,51	0	-118,51
1A	-118,51	-116,37	-118,51	0	-118,51	-118,51	0	-118,51	-118,51	0	-118,51
2F	-85,26*	-85,26	-74,29	2,95	-79,32	-83,60	0,83	-85,26	-83,06	1,62	-85,26
2S	-92,09*	-92,09	-90,05	1,33	-91,89	-91,45	0,78	-92,09	-91,69	0,70	-92,09
2M	-104,81	-102,63	-102,94	0,95	-104,81	-104,81	0	-104,81	-104,81	0	-104,81
2L	-104,81	-106,06	-105,98	0,77	-107,44	-107,32	0,63	-107,64	-107,11	1,07	-107,64
2A	-117,24	-117,24	-117,24	0	-117,24	-117,24	0	-117,24	-117,24	0	-117,24
3F	-56,7*	-56,70	-25,26	11,54	-43,1	-40,04	8,47	-49,61	-38,69	8,62	-47,99
3S	-99,49*	-99,49	-83,37	16,91	-95,66	-98,87	0,61	-99,49	-98,08	1,07	-99,49
3M	-106,59*	-106,59	-105,89	1,4	-106,59	-106,59	0	-106,59	-106,59	0	-106,59
3L	-107,87*	-104,72	-106,68	0,73	-107,87	-107,61	0,51	-107,87	-107,87	0	-107,87
3A	-111,29	-92,22	-112,08	0,47	-112,50	-112,26	0,38	-112,50	-112,41	0,044	-112,50
4F	-63,08*	-63,08	-16,15 ¹	16,95	-22,61	-19,28	21,69	-54,06	-28,22 ¹	16,75	-45,87
4S	-100*	-99,43	-64,85	4,05	-70,3	-91,70	1,28	-93,42	-89,00	8,72	-96,96
4M	-105,42	-105,42	-89,83	5,15	-96,97	-98,99	4,16	-105,42	-97,08	6,83	-104,88
4L	-105,42	-96,96	-102,61	3,41	-105,27	-108,47	1,6	-109,27	-109,00	0,54	-109,27
4A	-105,42	-92,78	-111,74	0	-111,74	-111,74	0	-111,74	-111,74	0	-111,74
5F	-62,59*	-62,59	-33,08	13,08	-45,41	-56,35	5,56	-62,59	-55,96	4,17	-60,65
5S	-76,29*	-76,29	-65,05	5,21	-73,86	-75,80	0,97	-76,29	-75,80	0,97	-76,29
5M	-76,29*	-76,29	-75,52	0,73	-76,29	-76,29	0	-76,29	-76,29	0	-76,29
5L	-84,21*	-84,21	-84,21	0	-84,21	-84,21	0	-84,21	-84,21	0	-84,21
5A	-84,21	-43,74	-84,66	0	-84,66	-84,66	0	-84,66	-84,66	0	-84,66

¹ : 3 (resp. 4) réplifications donnent des solutions réalisables avec RW (resp. MW)

Tableau 9 – Résultats - instances 1 à 5 - Critère préférence des patients

- Borsani, V., Matta, A., Beschi, G. & Sommaruga, F. (2006). A home care scheduling model for human resources, *Service Systems and Service Management, 2006 International Conference on*, Vol. 1, IEEE, pp. 449 – 454.
- Bredström, D. & Rönnqvist, M. (2008). Combined vehicle routing and scheduling with temporal precedence and synchronization constraints, *European journal of operational research* **191**(1): 19 – 31.
- Cheng, E. & Rich, J. L. (1998). A home health care routing and scheduling problem, *Rice University, Texas, Tech. Rep. TR98-04*.
- De Angelis, V. (1998). Planning home assistance for aids patients in the city of rome, italy, *Interfaces* **28**(3): 75 – 83.
- Eveborn, P., Flisberg, P. & Rönnqvist, M. (2006). Laps care - an operational system for staff planning of home care, *European Journal of Operational Research* **171**(3): 962 – 976.
- Kergosien, Y., Lenté, C. & Billaut, J.-C. (2009). Home health care problem: An extended multiple traveling salesman problem, *4th Multidisciplinary International Conference on Scheduling: Theory and Applications (MISTA'09), Dublin (Irlande)*, pp. 85 – 92.
- Liu, R., Jiang, Z., Fung, R. Y., Chen, F. & Liu, X. (2010). Two-phase heuristic algorithms for full truckloads multi-depot capacitated vehicle routing problem in carrier collaboration, *Computers & Operations Research* **37**(5): 950–959.
- Lourenço, H. R., Martin, O. C. & Stützle, T. (2003). *Iterated local search*, Springer.
- Rasmussen, M. S., Justesen, T., Dohn, A. & Larsen, J. (2012). The home care crew scheduling problem: Preference-based visit clustering and temporal dependencies, *European Journal of Operational Research* **219**(3): 598 – 610.
- Redjem, R., Kharraja, S., Xie, X., Marcon, E. et al. (2012). Routing and scheduling of caregivers in home health care with synchronized visits, *Proceedings of MOSIM'12*.
- Thomsen, K. (2006). *Optimization on home care*, PhD thesis, Technical University of Denmark, DTU, DK-2800 Kgs. Lyngby, Denmark.