



Rapport de recherche

Travail présenté à Claude-Guy Quimper
IFT-7020 Optimisation combinatoire
Session d'hiver 2018

Réalisé par
François Bérubé et François Pelletier ;
900226407, 908144032

Table des matières

1	Introduction	1
2	Description du problème	1
2.1	Instance considérée	1
2.1.1	Horaire initial	1
2.1.2	Incertitude	2
2.1.3	Recouvrement	2
3	Approche proposée	2
3.1	Paramètres	2
3.2	Variables	3
3.3	Énumération des horaires valides	4
3.4	Contraintes	4
3.5	Génération des scénarios de demande excédentaire	5
3.6	Génération de scénarios d’absences	5
3.7	Recouvrement des horaires	6
4	Protocole d’expérimentation	6
4.1	Production des horaires initiaux	6
4.2	Scénarios et simulation	7
5	Résultats et discussion	8
5.1	Comparaison des approches proposées	8
5.2	Résultats de l’étude de cas	8
6	Conclusion	9
	Bibliographie	11

1 Introduction

La planification d’horaires de travail est un enjeu important pour plusieurs entreprises et organisations publiques. Si elle est inadéquate, elle peut entraîner une diminution des profits en plus d’avoir des répercussions sur les dates de livraison de ses différents contrats. Parmi les raisons qui rendent cette tâche difficile, on dénombre les restrictions complexes de la loi sur les normes du travail, une variabilité saisonnière des besoins en main-d’oeuvre et une incertitude liée au taux d’absentéisme. Les horaires produits doivent permettre le rajustement selon les deux facteurs précédents, tout en minimisant le cout des salaires.

Le présent rapport propose une approche stochastique pour la production d’horaires robustes en fonction du taux d’absentéisme et de la variabilité de la demande de travail. Une banque d’horaires valides est d’abord générée avec le solveur Choco de manière efficace et en prenant soin d’obtenir des différences importantes quant aux types d’employés (temps plein ou partiel). Par la suite, ces horaires variés sont soumis à une fonction qui génère des absences et des augmentations ponctuelles de la demande de travail. On utilise ensuite un algorithme de recouvrement pour combler les différentes périodes en déficit de main-d’œuvre. Les couts de recouvrement moyens de ces différents horaires modifiés serviront à évaluer la robustesse des horaires face aux probabilités d’absentéisme et d’augmentation de la demande. Enfin, des résultats montreront que cette méthode permet d’évaluer le ratio `temps plein / temps partiel` optimal en fonction de ces facteurs.

2 Description du problème

Nous présentons un problème de planification d’horaires de travail optimaux et robustes. L’approche de modélisation proposée inclut des éléments d’incertitude au niveau de l’absentéisme des employés et de la possibilité d’un accroissement temporaire de la demande à tout instant. L’horaire optimal sélectionné doit minimiser les couts de recouvrement des absences, en plus de permettre l’augmentation de la demande en employés tout en limitant le recours à des heures supplémentaires. Une fois que les scénarios aléatoires sont générés, il faut effectuer un recouvrement au cout le plus faible, tout en respectant un ensemble de contraintes différent.

2.1 Instance considérée

2.1.1 Horaire initial

On considère la planification d’un horaire de travail initial sur un cycle de 14 jours. Chaque journée est composée de six périodes de travail, d’une durée de quatre heures chacune. Il y a deux types d’employés : à temps plein (*FT*) qui travaillent 80 heures régulières par cycle et à temps partiel (*PT*) qui travaillent entre 32 et 80 heures par cycle. Un niveau de demande de base sur deux périodes est établi à deux pour la matinée, quatre pour le milieu de la journée et trois pour la soirée, et ce pour la durée du cycle.

Tous les employés, lorsqu’ils effectuent une journée de travail, sont présents durant deux périodes consécutives, pour une durée totale de huit heures. Les employés à temps plein débutent soit à la première, la troisième ou la cinquième période. Une période de repos minimale de 12 heures est requise entre deux séquences de travail. De plus, les employés travaillent une fin de semaine sur deux, mais jamais plus de 5 journées consécutives. Ceux à temps partiel travaillent le même nombre de jours du lundi au vendredi.

Les employés ont un salaire de base de 10\$/h. On ajoute 1\$/h pour ceux à temps partiel afin de compenser une plus faible productivité. Les employés à temps plein ont un salaire de 15\$/h pour les

heures supplémentaires. De plus, tous engagent des frais fixes de 50\$ par cycle.

2.1.2 Incertitude

On considère deux sources d'incertitude : les absences des employés et l'accroissement de la demande. Cette approche s'inspire des travaux de [6]. La fréquence d'absence, à chaque période, variant entre 0 et 0.1. De plus, leur probabilité de retour à la période suivante, advenant une absence, est comprise dans l'ensemble . La probabilité associée à l'augmentation de la demande en employés est comprise dans l'ensemble $\{0, 0.25, 0.5, 0.75, 1\}$ pour un employé. On la multiplie par 0,2 pour deux employés et 0,04 pour trois employés supplémentaires. 10 scénarios d'augmentation sont générés et 100 d'absences le sont ensuite pour chacun, pour un total de 1000 simulations.

2.1.3 Recouvrement

Une fois les scénarios d'incertitude générés pour chaque horaire initial, on appliquera les règles de recouvrement suivantes, en considérant des périodes de quatre heures :

- Un maximum de trois périodes par quart de travail.
- Un minimum de trois périodes de repos entre les quarts de travail.
- Pour chaque horaire, un maximum de 20 périodes de travail après recouvrement des employés à temps partiel et de 30, pour ceux à temps plein.
- Les employés à temps plein ont droit aux heures supplémentaires pour chaque recouvrement effectué. De plus, ces derniers sont payés au salaire horaire de base en cas d'absence. Par contre, les employés à temps partiel n'ont pas ces deux avantages.

3 Approche proposée

On modélise ce problème à l'aide de la programmation par contraintes. Les différentes étapes suivies sont présentées à la figure 3. Le choix de cette méthodologie est basé sur différents travaux dans le domaine de la planification [2, 3, 5]. On développe donc un ensemble de paramètres, de variables et de contraintes.

3.1 Paramètres

L'horaire a une durée de J jours de P périodes d' $\frac{24}{P}$ heures chacune. La matrice $\mathbf{D} \in \mathbb{N}^{P \times J}$ représente la demande de travail où on définit celle de la période p de la journée j par $d_{p,j}$. L'équation (1) définit la demande totale pour la durée de l'horaire de travail .

$$d_{tot} = \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^J d_{p,j} \quad (1)$$

On représente l'ensemble des types d'employés disponibles $a \in \mathcal{A}$. Les employés travaillent entre $h_{min,a}$ et $h_{max,a}$ heures. On définit le nombre d'heures de repos minimal $r_{min,a}$ et le nombre maximal de journées consécutives par $j_{max,a}$.

Le nombre d'employés est variable. En tentant de résoudre le problème de satisfiabilité avec un nombre différent de chaque type, on peut d'estimer des bornes inférieure et supérieure à ce nombre. On peut aussi borner le maximum par les ratios suivants (2) :

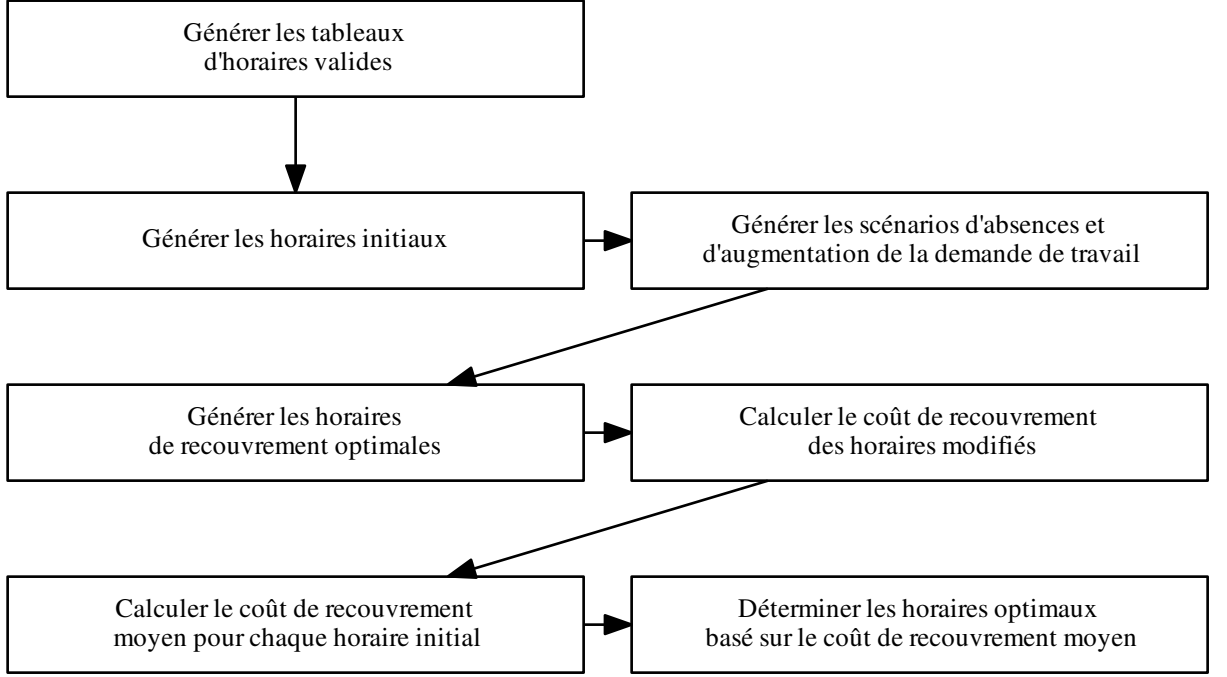


FIGURE 1 – Étapes de la production d’horaires optimaux et robustes

$$E_a = \frac{d_{tot}}{h_{min,a}}, \quad \forall a \in \mathcal{A} \quad (2)$$

Enfin, chacun a un salaire par période de s_a et encourent des frais fixes de f_a .

3.2 Variables

On représente les horaires de travail par deux tableaux \mathbf{X}_{FT} et \mathbf{X}_{PT} de variables booliennes x , vraies si l’employé e du type a travaille à la période p de la journée j et fausse sinon (3).

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_a &= (x_{e,j,p,a}) \in \mathbb{N}^{E_a \times J \times P}, & \forall a \in \mathcal{A} \\ \text{dom}(x_{e,j,p,a}) &= \{0, 1\}, & \forall 1 \leq e \leq E_a, 1 \leq j \leq J, 1 \leq p \leq P, a \in \mathcal{A} \end{aligned} \quad (3)$$

On définit l’horaire de l’employé e de type a par la matrice $X_{e,a}$ (4).

$$X_{e,a} = \begin{bmatrix} x_{e,1,1,a} & \cdots & x_{e,1,J,a} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{e,P,1,a} & \cdots & x_{e,P,J,a} \end{bmatrix} \quad \forall e \in [0, E_a], a \in \mathcal{A} \quad (4)$$

3.3 Énumération des horaires valides

Afin de réduire la taille du problème, la liste des horaires quotidiens valides pour un employé de chaque type est générée. Ces deux sous-problèmes de satisfaction peuvent aussi être résolus avec le solveur Choco [7]. L'énumération de toutes les solutions obtenues servira à générer l'ensemble des tuples d'une contrainte TABLEAU.

On définit un vecteur $\vec{H}_a \in \mathbb{N}^J$. Les variables booliennes h_j forment un horaire de J journées pour un employé de type a . Il doit respecter le nombre de périodes travaillées désirées (5).

$$\frac{h_{min,a}}{i_a} \leq \sum_{j=1}^J h_j \leq \frac{h_{max,a}}{i_a} \quad (5)$$

L'horaire de l'employé à temps partiel doit contenir un même nombre de jours dans les deux sous-périodes du lundi au vendredi $j \in [p_{min}^{(1)}, p_{max}^{(1)}] = [1, 5]$ et $j \in [p_{min}^{(2)}, p_{max}^{(2)}] = [8, 12]$ (6).

$$\sum_{j=p_{min}^{(1)}}^{p_{max}^{(1)}} h_j = \sum_{j=p_{min}^{(2)}}^{p_{max}^{(2)}} h_j \quad (6)$$

Il doit inclure le travail durant une fin de semaine sur deux (7).

$$h_6 = h_7 \wedge h_{13} = h_{14} \wedge h_6 \neq h_{13} \quad (7)$$

Il doit respecter le nombre maximum de jours consécutifs travaillés autorisés. On utilise une contrainte REGULAR «réifiée» pour représenter le non-respect de cette contrainte : lorsqu'une séquence de jours dont la longueur est supérieure à $j_{max,A}$. L'expression régulière qui modélise ces horaires est présentée à la figure 2. On obtient, pour chaque type de travailleur, une liste de vecteurs à laquelle on ajoute le vecteur nul, pour la situation où l'employé est exclu de l'horaire.

$[01]*1\{5,\}[01]*$

FIGURE 2 – Expression régulière qui représente l'horaire des employés.

Enfin, en effectuant le produit tensoriel de la matrice des horaires sur deux semaines $h_{reg,FT}$ (8) et de la matrice des $n_{hq,a}$ horaires quotidiens (9), on obtient un tableau d'horaires par périodes travaillées valides $\mathbf{V}_a \in \mathbb{N}^3$ (10).

$$\mathbf{H}_a = \left(\vec{H}_a \right) \quad (8)$$

$$\mathbf{Q}_a = \begin{bmatrix} q_{1,1} & \cdots & q_{P,1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ q_{1,n_{hq,a}} & \cdots & q_{P,n_{hq,a}} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\mathbf{V}_a = \mathbf{H}_a \otimes \mathbf{Q}_a \quad (10)$$

3.4 Contraintes

Chaque horaire d'employé X_e doit d'abord être valide (section 3.3). Il doit donc satisfaire une contrainte TABLEAU (11). La planification doit aussi satisfaire la demande en employés, en utilisant

une contrainte SUM (12). Afin de réduire la taille de l'arbre de recherche, nous imposons la contrainte de bris de symétrie suivante : les horaires des employés à temps plein et à temps partiel doivent, séparément, en ordre lexicographique. On utilise alors la contrainte LEXLESSEQ (13).

$$\mathcal{C}_1 : \text{TABLEAU}(\mathbf{V}_a, X_e), \quad \forall e \in [1, E_a], a \in \mathcal{A} \quad (11)$$

$$\mathcal{C}_2 : \sum_{a \in \mathcal{A}} \sum_{e=1}^{E_a} x_{e,p,j} = d_{p,j}, \quad \forall 1 \leq p \leq P, 1 \leq j \leq J \quad (12)$$

$$\mathcal{C}_3 : \text{LEXLESSEQ}(X_i, X_{i+1}), \quad \forall i \in [1, E^a - 1], a \in \mathcal{A} \quad (13)$$

3.5 Génération des scénarios de demande excédentaire

Chaque valeur $d_{p,j}$ de la matrice de demande peut augmenter par une quantité de demande excédentaire, représentée par une variable aléatoire $D_{p,j}^{(exc)}$ où (14) définit la fonction de masse de probabilités. On utilise la librairie JDistLib [4] pour générer des valeurs aléatoires de cette variable.

$$P_{D^{(exc)}}(x) = \begin{cases} 1 - 1.24p & x = 0 \\ p, & x = 1 \\ 0.2p, & x = 2 \\ 0.04p, & x = 3 \end{cases}, \quad p \in \left[0, \frac{25}{31}\right] \quad (14)$$

On obtient alors une matrice de demande modifiée \mathbf{D}' où $d'_{p,j} = d_{p,j} + D_{p,j}^{(exc)}$.

On pourra répéter cette procédure pour générer différentes matrices de demande de travail modifiées. Cette approche de simulation s'inspire des recherches de [8] sans toutefois reprendre le modèle des variables stochastiques.

3.6 Génération de scénarios d'absences

On génère des scénarios d'absences $\vec{B}_{e,A}$ indépendants pour chaque employé e de type A (15) à l'aide d'une chaîne de Markov sur deux états (0 : indisponible ; 1 : disponible) ayant pour matrice de transition 16 où $p(s_1, s_2)$ est la probabilité de transition entre les états s_1 et s_2 . Tout comme pour la génération des scénarios de demande, on utilise JDistLib [4] pour générer aléatoirement les valeurs de transition entre chaque période.

$$\vec{B}_{e,A} = [b_{1,1}, \dots, b_{P,1}, b_{1,2}, \dots, b_{P,2}, \dots, b_{1,J}, \dots, b_{P,J}], \quad \forall 1 \leq e \leq E_A \quad (15)$$

$$S = \begin{bmatrix} p(0,0) & 1 - p(0,0) \\ 1 - p(1,1) & p(1,1) \end{bmatrix} \quad (16)$$

On produit ensuite une matrice de présences \mathbf{B}_A à l'aide du vecteur $\vec{B}_{e,A}$. Pour produire la grille horaire du scénario d'absence $\mathbf{X}_{abs,A}$, on effectue le produit de Hadamard entre la grille initiale et cette matrice.

$$\mathbf{B}_A = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{1,A} \\ \vdots \\ \mathbf{B}_{E_A,A} \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\mathbf{X}_{abs,A} = \mathbf{X}_A \cdot \mathbf{B}_A \quad (18)$$

On pourra répéter cette procédure plusieurs fois pour obtenir différents scénarios d'absences.

3.7 Recouvrement des horaires

Une fois les absences et les nouveaux vecteurs de demande de travail générés dans chacun des horaires initiaux, un algorithme de recouvrement local des horaires est lancé sur chacune des simulations. Celui-ci est semblable à celui utilisé dans des travaux portant sur un problème semblable [3, 5]. Cette étape permettra de trouver des couts de recouvrement moyens pour chacune des horaires initiaux et ainsi, trouver laquelle correspond au cout de recouvrement le plus faible.

Étant donné que chaque recouvrement influence les subséquents en raison des contraintes définies à la section 2.1.3, ce problème est NP-complet. Le nombre de nœuds de l'arbre de recherche permettant de trouver le cout minimal varie donc de façon exponentielle avec le nombre d'absences et d'augmentation de demande de travail. Pour éviter que le temps de calcul soit trop important pour cette phase de recouvrement, une fouille partielle de l'arbre de recherche est effectuée par des plongées successives dans l'arbre de recherche. Le pseudocode associé à cet algorithme est présenté à l'annexe 2. L'algorithme de recouvrement a les caractéristiques suivantes :

- Les plongées successives sont guidées par une euristique qui choisit l'action de recouvrement ayant le cout minimum à chacun des nœuds. Si plusieurs actions correspondent à ce cout minimum, cette dernière est choisie de façon aléatoire, ce qui permet de mieux explorer l'arbre de recherche.
- Lors de ces plongées successives dans l'arbre de recherche, chaque action de recouvrement, caractérisée par un employé donné recouvrant à une période de travail donné, est marquée dans une matrice de nœuds visités pour éviter de refaire celle-ci lors d'une plongée subséquente.
- Lorsqu'aucune action n'est possible sans que l'horaire ne soit complètement recouvert, on recommence une nouvelle fouille à partir du sommet de l'arbre.
- Lorsqu'un certain nombre de retours arrière est atteint, on réinitialise la matrice des nœuds visités. L'algorithme permet aussi de s'arrêter après avoir atteint un seuil de retours arrière et qu'aucune solution n'a été trouvée.

Bien que l'horaire de recouvrement obtenu par cet algorithme ne conduit pas au cout minimum dans tous les cas, celui-ci s'en approche. Cette façon de procéder a cependant l'avantage d'être beaucoup plus rapide qu'une fouille complète. Cela permet de compenser ce biais par rapport à l'optimum, par un plus grand nombre de simulations effectuées.

4 Protocole d'expérimentation

4.1 Production des horaires initiaux

L'instance de base pour la comparaison des différents résultats correspond au problème de satisfiabilité des contraintes de l'horaire initial.

La première approche explorée est de construire un seul modèle de programmation par contraintes pour l'ensemble du problème. Ce modèle incluait les contraintes sur les horaires ainsi que celles pour tous les types d'employés. De plus, le nombre d'employés était aussi une variable par la possibilité d'inclure un horaire n'ayant aucune période de travail. Cette approche a permis de confirmer que notre problème était satisfiable, mais qu'il était difficile d'obtenir une variété de solutions, ce qui était nécessaire pour la création des scénarios.

On a aussi testé une fonction d'optimisation inspirée des travaux de [1], mais notre formulation du problème faisait en sorte qu'il est toujours plus efficace de maximiser le nombre d'employés à temps plein. La satisfiabilité de l'instance est vérifiée pour différents nombres d'employés dans chaque cas et ensuite, il a pu être borné. Ce choix est devenu notre seconde approche.

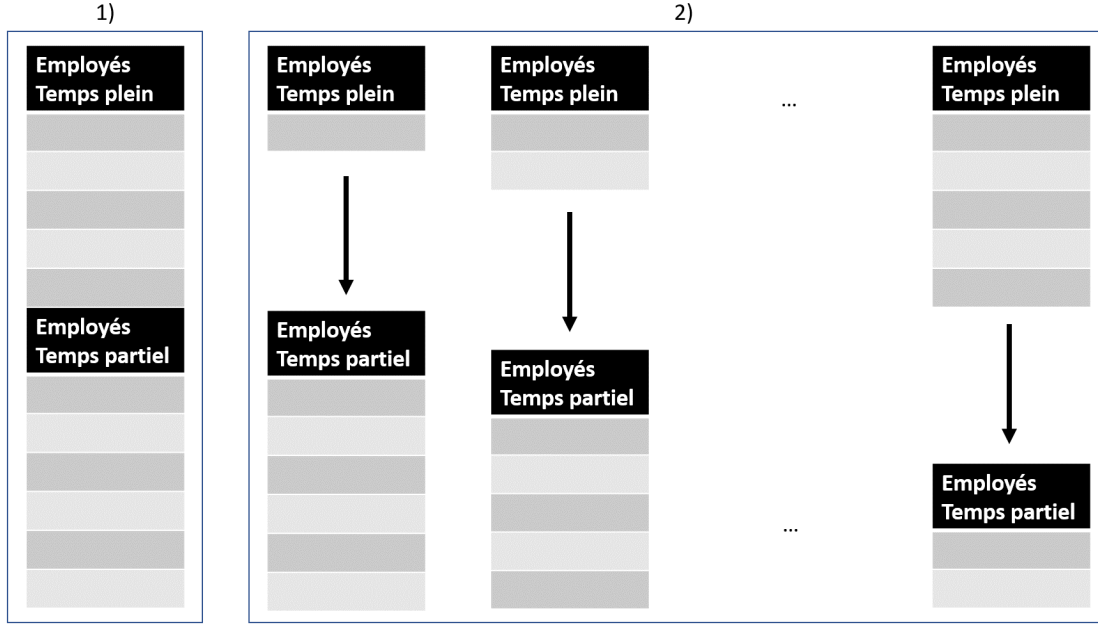


FIGURE 3 – Modèles proposés pour la génération des horaires initiaux.

Il semble donc approprié de tenter de couvrir le maximum d’heures avec un nombre fixe d’employés à temps plein, puis de combler les périodes en excédent avec des employés à temps partiel. S’en suit une division en deux problèmes de satisfaction de contraintes résolus consécutivement.

La contrainte \mathcal{C}_2 (12) est donc relaxée pour la résolution de la première étape (19). On enlève ensuite la possibilité d’avoir un horaire vide du tableau de la contrainte \mathcal{C}_1 (11). La seconde étape demeure semblable à l’approche précédente, sauf que le tableau \mathbf{X}_{FT} est instancié.

$$\mathcal{C}'_2 : \sum_{e=1}^{E_a} x_{e,p,j} \leq d_{p,j} \quad (19)$$

On a exploré l’utilisation de différentes heuristiques de recherche sommairement. La construction d’un vecteur qui contient toutes les variables du problème est une condition nécessaire pour l’appel d’autres heuristiques dans le solveur Choco. Il s’est donc avéré difficile de mettre en œuvre cette exploration étant donné la taille de l’instance. L’heuristique par défaut est conservée. Cette approche nous a permis d’obtenir des solutions variées, permettant la suite du processus de création d’horaires optimaux et robustes.

4.2 Scénarios et simulation

L’approche retenue pour générer les scénarios d’absence consiste à utiliser une chaîne de Markov. Cette approche permet d’inclure une relation de dépendance entre les différentes périodes. Pour la gestion de la demande, il aurait aussi été possible d’utiliser cette approche, mais afin de conserver la capacité de générer des scénarios où le recouvrement est possible, le choix d’une distribution indépendante pour chaque période est plus simple.

5 Résultats et discussion

5.1 Comparaison des approches proposées

Le problème de référence peut être résolu avec un seul retour arrière. La première approche proposée permet d’obtenir une première solution dans un temps assez court, mais ne parvient pas à offrir d’autres solutions par la suite.

Instance	Temps	Nœuds	Retours arrière
Référence	0,627	5377	1
1 ^{re} approche	4,039	26129	43200

TABLE 1 – Statistiques, référence et première approche

La seconde approche permet de constater la structure du problème : la complexité de celui-ci tient au niveau des horaires des employés à temps partiel. Lorsque le nombre d’employés à temps plein augmente, la taille de l’instance diminue considérablement.

E_{FT}	Temps	Nœuds	Retours arrière
2	13,377	122100	240832
3	0,473	4683	7125
4	1,812	16543	31084
5	0,456	5728	9719
6	0,321	4363	7203
7	0,553	7255	13221
8	0,059	1479	1897
9	0,021	825	890

TABLE 2 – Statistiques, seconde approche

5.2 Résultats de l’étude de cas

À l’aide du modèle de génération en deux phases, on obtient huit horaires qui présentent des ratios **temps plein / temps partiel** différents (voir annexe 1). Puisque les deux types d’employés ont des contraintes différentes quant au recouvrement des plages horaires, on a pu tester l’effet du taux d’absentéisme et de l’augmentation de la demande. L’effet de ces deux paramètres est présenté au tableau 3. Ces couts de recouvrement sont présentés comme un ratio par rapport au cout de l’horaire optimal, soit un nombre d’employés à temps plein maximal.

Comme le montre ce tableau, pour une probabilité d’absentéisme nulle, le cout des horaires augmente en fonction du nombre d’employés à temps partiel. Cela est dû au fait que ces employés ont un taux de base 10% plus élevé que celui des employés à temps plein. De plus, pour tous les ratios de type d’employés, la probabilité d’absentéisme et la probabilité d’augmenter la demande de travail sont corrélées au cout de recouvrement des horaires. Cette augmentation de couts est due à l’augmentation des heures travaillées (hausse de la demande), aux heures supplémentaires des employés à temps plein ainsi que du taux de base supérieur des employés à temps partiel. Ces derniers sont privilégiés pour effectuer les recouvrements.

Enfin, ces résultats démontrent que le ratio de type d’employés qui conduit à l’horaire avec un cout de recouvrement minimal varie selon les deux paramètres testés. Lorsque le nombre d’absences ou la demande de travail supplémentaire augmentent de façon importante, ratio **temps partiel/temps**

TABLE 3 – Effet de l’absentéisme et de l’augmentation de la demande sur le cout moyen de recouvrement.

Probabilité absence	Probabilité augmentation Demande	Ratio Employes Temps Plein / (Employes Temps Plein + Employes Temps Partiel)							
		0.11	0.17	0.22	0.28	0.33	0.39	0.44	0.50
0.00	0.00	+5.0	+4.3	+3.5	+2.8	+2.1	+1.4	+0.7	+0.0 (0) ¹
0.02	0.00	+5.6	+5.3	+5.0	+4.5	+4.2	+3.9	+3.5	+3.1 (0.03) ¹
0.04	0.00	+6.3	+6.3	+6.2	+6.1	+6.2	+6.2	+6.1	+6.0 (0.04) ¹
0.06	0.00	+6.9	+7.2	+7.4	+7.6	+8.0	+8.2	+8.5	+8.8 (0.04) ¹
0.08	0.00	+7.4	+8.0	+8.5	+9.1	+9.7	+10.2	+10.8	+11.4 (0.03) ¹
0.10	0.00	+7.9	+8.7	+9.5	+10.4	+11.2	+12.0	+13.0	+13.7 (0.04) ¹
0.02	0.25	+17.4	+17.2	+17.0	+16.8	+16.7	+16.4	+16.3	+16.0 (0.04) ¹
0.02	0.50	+28.5	+28.5	+28.5	+28.4	+28.5	+28.3	+28.4	+28.2 (0.05) ¹
0.02	0.75	+40.0	+40.0	+40.2	+40.3	+40.5	+40.4	+40.7	+40.6 (0.06) ¹
0.02	1.00	+48.7	+48.7	+49.0	+49.0	+49.4	+49.4	+49.7	+49.8 (0.08) ¹

¹Écart maximal mesuré dans un échantillon de 30 lots de 1000 simulations.

plein supérieur permet d’obtenir un horaire au cout de recouvrement le plus faible. La principale raison est une diminution des heures supplémentaires effectuée par les employés à temps plein. La figure 4 montre les ratios à privilégier pour la construction des horaires en fonction des probabilités d’absence et d’augmentation de la demande de travail.

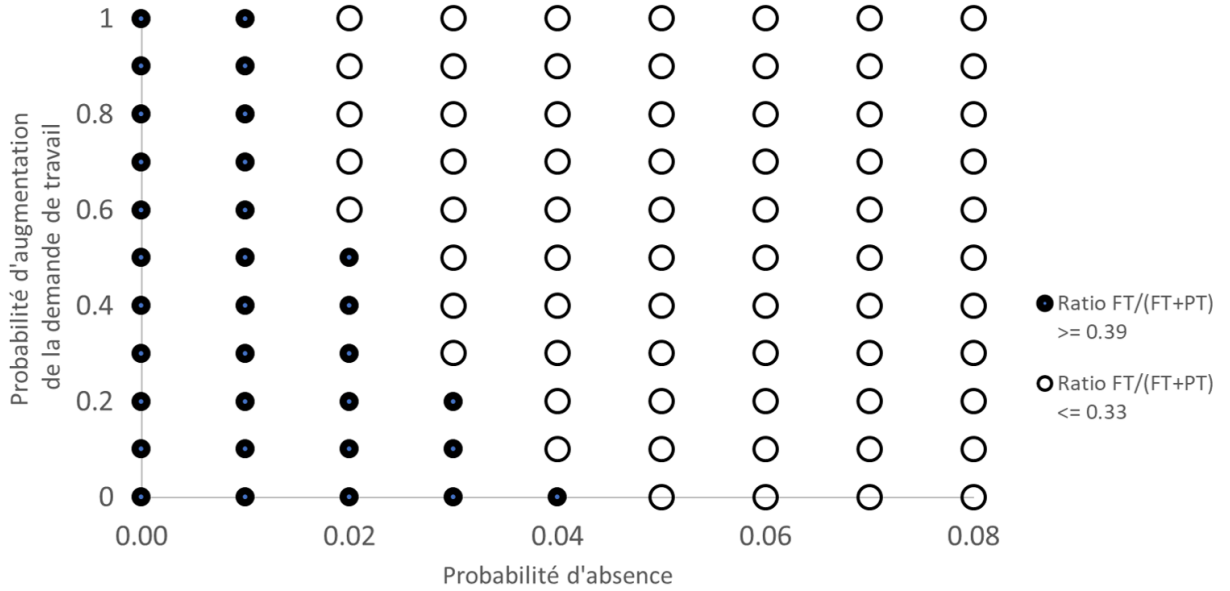


FIGURE 4 – Proportion d’employés à temps plein optimale en fonction des probabilités d’absentéisme et d’augmentation de la demande de travail.

6 Conclusion

Dans ce rapport, on propose une approche stochastique pour la production d’horaires de travail optimaux. Par rapport à d’autres travaux qui portent sur un problème semblable, cette étude inclut

l'élaboration d'un modèle avec une résolution en deux étapes. Celle-ci s'est avérée efficace pour la production d'une banque d'horaires qui inclut des ratios de type d'employés différents. On a effectué des simulations depuis cette banque d'horaires, impliquant la génération d'absences et la modification de la demande de travail par une approche probabiliste. Enfin, on utilise un algorithme, sur chacune des horaires simulés, afin d'évaluer le cout associé à leur recouvrement. Avec un grand nombre de simulations et en calculant la moyenne des couts de recouvrement, il a été possible d'évaluer précisément la robustesse des différents horaires face à l'absentéisme et aux variations de la demande de travail. De plus, l'approche proposée permet une grande flexibilité quant au type d'horaires produits et pourrait être adaptée à d'autres impondérables auxquels font face les entreprises.

Quelques améliorations pourraient être apportées à l'approche actuelle. Tout d'abord, le principe de production d'horaires initiaux en deux étapes aurait pu être étendu pour permettre la production d'horaires ayant des nombres d'employés différents. En effet, il serait possible de définir d'autres classes d'employés à temps partiel basées sur leur nombre d'heures travaillées. Ainsi, en ajoutant une étape intermédiaire qui tire profit de ces différentes classes, on pourrait modifier le nombre d'employés actifs. Et ce, tout en diminuant les tailles des instances à traiter par le solveur. Une autre limitation de cette étude est qu'elle ne prend pas en considération les effets négatifs de changements excessifs aux horaires de travail des différents employés. Ces effets négatifs auraient pu être quantifiés et ajoutés au calcul du cout de recouvrement. Enfin, les valeurs de certains paramètres de cette étude sont fictives et auraient pu être basées sur des cas réels.

Bibliographie

- [1] Nicolas Chapados, Marc Joliveau, Pierre L'Ecuyer, and Louis-Martin Rousseau. Retail store scheduling for profit. *European Journal of Operational Research*, 239(3) :609–624, December 2014. ISSN 0377-2217. doi : 10.1016/j.ejor.2014.05.033.
- [2] Fred F. Easton and John C. Goodale. Schedule recovery : Unplanned absences in service operations*. 36(3) :459–488. ISSN 0011-7315. doi : 10.1111/j.1540-5414.2005.00080.x.
- [3] Daesik Hur, Vincent Mabert, and Kurt Bretthauer. Real-time work schedule adjustment decisions : An investigation and evaluation. 13(4) :322–339. ISSN 10591478.
- [4] Roby Joehanes. *JDistlib : Java library of statistical distribution*, 2018. URL <https://sourceforge.net/projects/jdistlib/>.
- [5] Michael Mac-Vicar, Juan Carlos Ferrer, Juan Carlos Muñoz, and César Augusto Henao. Real-time recovering strategies on personnel scheduling in the retail industry. 113 :589–601. ISSN 03608352. doi : 10.1016/j.cie.2017.09.045.
- [6] Alessandra Parisio and Colin Neil Jones. A two-stage stochastic programming approach to employee scheduling in retail outlets with uncertain demand. *Omega*, 53 :97–103, June 2015. ISSN 0305-0483. doi : 10.1016/j.omega.2015.01.003.
- [7] Charles Prud'homme, Jean-Guillaume Fages, and Xavier Lorca. *Choco Documentation*. TASC - LS2N CNRS UMR 6241, COSLING S.A.S., 2017. URL <http://www.choco-solver.org>.
- [8] Toby Walsh. Stochastic Constraint Programming. In *Proceedings of the 15th European Conference on Artificial Intelligence*, ECAI'02, pages 111–115, Amsterdam, The Netherlands, The Netherlands, 2002. IOS Press. ISBN 978-1-58603-257-9. URL <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=3000905.3000930>.

Annexe 1 : Horaires initiales générées par le modèle

Schedule Day	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	Worked Periods
Part-Time Employees															
Employee 01	000000	000000	000000	000000	110000	110000	110000	110000	110000	110000	000000	110000	000000	000000	14
Employee 02	000000	000000	000000	000011	000011	000011	000011	000011	000011	000000	000011	000011	000011	000000	16
Employee 03	000000	000000	001100	001100	001100	001100	001100	001100	000000	001100	001100	000000	000000	000000	16
Employee 04	000000	000011	000000	000011	000011	000011	000011	000011	000011	000000	000000	000011	000000	000000	16
Employee 05	000000	000011	000011	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000011	000011	08
Employee 06	000000	001100	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	001100	001100	08
Employee 07	000000	001100	001100	001100	001100	000000	000000	001100	000000	000000	000000	000000	001100	001100	16
Employee 08	000000	001100	001100	001100	001100	001100	001100	000000	001100	001100	000000	000000	000000	000000	16
Employee 09	000000	110000	110000	110000	000000	000000	000000	000000	110000	110000	110000	000000	110000	110000	16
Employee 10	000011	000000	000000	000011	000000	000011	000011	000000	000011	000011	000011	000011	000000	000000	14
Employee 11	000011	000000	000011	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000011	000000	000011	10
Employee 12	001100	000000	000000	000000	000000	000000	000000	001100	001100	001100	001100	000000	001100	001100	14
Employee 13	001100	000000	000000	000000	000000	001100	001100	000000	001100	001100	001100	001100	000000	000000	14
Employee 14	001100	000000	000000	000000	001100	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	001100	001100	08
Employee 15	110000	000000	110000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	110000	000000	110000	110000	10
Employee 16	110000	110000	000000	110000	110000	110000	110000	110000	000000	000000	000000	110000	000000	000000	16
Full-Time Employees															
Employee 01	000011	000011	000011	000000	000011	000000	000000	000011	000011	000011	000000	000011	000011	000011	20
Employee 02	001100	001100	001100	001100	000000	001100	001100	001100	001100	000000	001100	001100	000000	000000	20
Working Employees	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	
Required Workforce	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	
Total schedule Cost : \$12676,00															

TABLE 4 – Horaire initiale ayant un ratio employés temps plein / employés temps partiel de 0.11.

Schedule Day	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	Worked Periods
Part-Time Employees															
Employee 01	000000	000000	000011	000011	000000	000011	000011	000011	000011	000011	000000	000011	000011	000000	000000 16
Employee 02	000000	000000	110000	000000	110000	110000	110000	000000	000000	110000	110000	110000	000000	000000	000000 14
Employee 03	000000	000000	110000	110000	110000	000000	000000	110000	110000	000000	000000	110000	110000	110000	000000 16
Employee 04	000000	000011	000000	000000	000011	000000	000000	000011	000011	000011	000000	000011	000011	000011	000011 16
Employee 05	000000	000011	000000	000011	000011	000011	000011	000000	000000	000011	000011	000011	000000	000000	000000 16
Employee 06	000000	001100	000000	001100	000000	001100	001100	001100	001100	001100	000000	000000	001100	000000	000000 14
Employee 07	000000	001100	000000	001100	001100	001100	001100	000000	001100	000000	001100	001100	000000	000000	000000 16
Employee 08	000000	001100	001100	000000	001100	001100	001100	001100	000000	000000	001100	001100	000000	000000	000000 16
Employee 09	000011	000000	000000	000011	000000	000011	000011	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000 08
Employee 10	000011	000000	000011	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000011	000011 08
Employee 11	001100	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	001100	000000	000000	001100	001100 08
Employee 12	001100	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	001100	000000	000000	001100	001100 08
Employee 13	001100	000000	001100	000000	000000	001100	001100	000000	000000	000000	001100	000000	000000	000000	000000 10
Employee 14	110000	110000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	110000	000000	000000	000000	110000	110000 10
Employee 15	110000	110000	000000	110000	000000	110000	110000	110000	000000	110000	110000	000000	000000	000000	000000 16
Full-Time Employees															
Employee 01	000000	001100	001100	001100	001100	000000	000000	001100	001100	001100	001100	000000	001100	001100	001100 20
Employee 02	000011	000011	000011	000000	000011	000000	000000	000011	000011	000011	000011	000000	000011	000011	000011 20
Employee 03	001100	000000	001100	001100	001100	000000	000000	001100	001100	001100	000000	001100	001100	001100	001100 20
Working Employees	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433
Required Workforce	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433
Total schedule Cost : \$12516,00															

TABLE 5 – Horaire initiale ayant un ratio employés temps plein / employés temps partiel de 0.17.

Schedule Day	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	Worked Periods
Part-Time Employees															
Employee 01	000000	000000	000000	000000	000000	001100	001100	001100	001100	001100	000000	000000	000000	000000	10
Employee 02	000000	000000	000000	000000	000011	000011	000011	000000	000000	000011	000000	000000	000000	000000	08
Employee 03	000000	000000	000000	000011	000000	000011	000011	000000	000000	000011	000000	000000	000000	000000	08
Employee 04	000000	001100	000000	001100	001100	000000	000000	001100	000000	001100	000000	001100	001100	001100	16
Employee 05	000000	001100	001100	001100	000000	000000	000000	000000	001100	001100	001100	000000	001100	001100	16
Employee 06	000000	001100	001100	001100	001100	001100	001100	000000	000000	000000	001100	001100	000000	000000	16
Employee 07	000000	110000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	110000	110000	110000	08
Employee 08	000000	110000	000000	110000	110000	110000	110000	000000	110000	110000	110000	000000	000000	000000	16
Employee 09	000011	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000011	000011	000011	08
Employee 10	001100	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	001100	000000	001100	000000	001100	001100	10
Employee 11	001100	000000	000000	000000	001100	001100	001100	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	08
Employee 12	001100	001100	001100	000000	000000	001100	001100	001100	000000	000000	001100	001100	000000	000000	16
Employee 13	110000	000000	110000	000000	000000	110000	110000	110000	110000	000000	110000	110000	000000	000000	16
Employee 14	110000	000000	110000	110000	110000	000000	000000	110000	000000	110000	000000	000000	110000	110000	16
Full-Time Employees															
Employee 01	000000	000011	000011	000011	000011	000000	000000	000011	000011	000011	000011	000000	000011	000011	20
Employee 02	000011	000011	000011	000000	000011	000000	000000	000011	000011	000000	000011	000011	000011	000011	20
Employee 03	000011	000011	000011	000011	000000	000011	000011	000011	000011	000000	000011	000011	000000	000000	20
Employee 04	001100	000000	001100	001100	001100	000000	000000	001100	001100	001100	000000	001100	001100	001100	20
Working Employees	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	
Required Workforce	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	
Total schedule Cost : \$12356,00															

TABLE 6 – Horaire initiale ayant un ratio employés temps plein / employés temps partiel de 0.22.

Schedule Day	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	Worked Periods
Part-Time Employees															
Employee 01	000000	000000	000000	001100	000000	001100	001100	000000	001100	001100	001100	000000	000000	000000	12
Employee 02	000000	000000	000011	000000	000000	000011	000011	000011	000011	000000	000000	000000	000000	000000	08
Employee 03	000000	000000	001100	000000	001100	001100	001100	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	08
Employee 04	000000	000000	001100	001100	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	001100	001100	08
Employee 05	000000	000000	110000	000000	000000	110000	110000	000000	000000	000000	110000	000000	000000	000000	08
Employee 06	000000	110000	000000	110000	000000	110000	110000	000000	000000	110000	000000	110000	000000	000000	12
Employee 07	000011	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000011	000011	08
Employee 08	000011	000000	000000	000000	000000	000011	000011	000000	000000	000000	000000	000000	000011	000000	08
Employee 09	001100	000000	001100	000000	001100	000000	000000	001100	001100	000000	000000	001100	001100	001100	16
Employee 10	001100	001100	000000	000000	000000	001100	001100	001100	001100	000000	001100	001100	001100	000000	16
Employee 11	001100	001100	000000	000000	001100	001100	001100	000000	001100	001100	000000	001100	000000	000000	16
Employee 12	001100	001100	000000	001100	000000	000000	000000	001100	000000	001100	001100	000000	001100	001100	16
Employee 13	110000	110000	000000	000000	110000	000000	000000	110000	110000	110000	000000	000000	110000	110000	16
Full-Time Employees															
Employee 01	000000	000011	000011	000011	000011	000000	000000	000011	000011	000011	000011	000000	000011	000011	20
Employee 02	000000	000011	000011	000011	000011	000000	000000	000011	000011	000011	000011	000000	000011	000011	20
Employee 03	000000	001100	001100	001100	001100	000000	000000	001100	001100	000000	001100	001100	001100	001100	20
Employee 04	000011	000011	000000	000011	000011	000011	000011	000000	000011	000011	000011	000011	000011	000000	20
Employee 05	110000	000000	110000	110000	110000	000000	000000	110000	110000	000000	110000	110000	110000	110000	20
Working Employees	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	
Required Workforce	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	
Total schedule Cost : \$12196,00															

TABLE 7 – Horaire initiale ayant un ratio employés temps plein / employés temps partiel de 0.28.

Schedule Day	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	Worked Periods
Part-Time Employees															
Employee 01	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	110000	110000	000000	000000	000000	110000	110000	08
Employee 02	000000	000000	000000	000000	000000	000011	000011	000011	000000	000011	000000	000000	000000	000000	08
Employee 03	000000	000000	000000	000000	000011	000011	000011	000000	000011	000011	000011	000011	000000	000000	14
Employee 04	000000	000000	000000	000000	001100	000000	000000	001100	000000	001100	001100	001100	001100	001100	14
Employee 05	000000	000000	000000	000000	001100	001100	001100	000000	001100	000000	000000	000000	000000	000000	08
Employee 06	000000	000000	000000	110000	110000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	110000	08
Employee 07	000000	000000	000011	000011	000000	000011	000011	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	08
Employee 08	000011	000011	000011	000011	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000011	000011	14
Employee 09	001100	000000	000000	000000	000000	001100	001100	000000	000000	001100	001100	000000	000000	000000	10
Employee 10	001100	000000	000000	001100	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	001100	08
Employee 11	001100	001100	001100	000000	000000	001100	001100	001100	000000	001100	000000	001100	000000	000000	16
Employee 12	001100	001100	001100	001100	000000	001100	001100	000000	001100	001100	000000	000000	000000	000000	16
Full-Time Employees															
Employee 01	000000	001100	001100	001100	001100	000000	000000	001100	001100	000000	001100	001100	001100	001100	20
Employee 02	000000	001100	001100	001100	001100	000000	000000	001100	001100	000000	001100	001100	001100	001100	20
Employee 03	000011	000011	000000	000011	000011	000000	000000	000011	000011	000000	000011	000011	000011	000011	20
Employee 04	000011	000011	000011	000000	000011	000000	000000	000011	000011	000011	000011	000000	000011	000011	20
Employee 05	110000	110000	110000	000000	110000	110000	110000	110000	000000	110000	110000	110000	000000	000000	20
Employee 06	110000	110000	110000	110000	000000	110000	110000	000000	110000	110000	110000	110000	000000	000000	20
Working Employees	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	
Required Workforce	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	
Total schedule Cost : \$12036,00															

TABLE 8 – Horaire initiale ayant un ratio employés temps plein / employés temps partiel de 0.33.

Schedule Day	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	Worked Periods
Part-Time Employees															
Employee 01	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	001100	001100	001100	001100	08
Employee 02	000000	000000	000000	000000	000000	001100	001100	001100	000000	001100	000000	000000	000000	000000	08
Employee 03	000000	000000	000000	000000	000011	000000	000000	000011	000000	000000	000011	000000	000011	000011	10
Employee 04	000000	000000	000000	000011	000000	000011	000011	000011	000011	000011	000000	000011	000000	000000	14
Employee 05	000000	000000	001100	000000	000000	001100	001100	001100	001100	001100	001100	000000	000000	000000	14
Employee 06	000000	000000	110000	000000	000000	110000	110000	000000	000000	000000	000000	000000	110000	000000	08
Employee 07	000000	110000	000000	000000	000000	110000	110000	000000	000000	000000	000000	000000	110000	000000	08
Employee 08	000011	000000	000011	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000011	08
Employee 09	000011	000011	000011	000000	000000	000011	000011	000000	000000	000000	000011	000000	000000	000000	12
Employee 10	001100	001100	000000	000000	000000	001100	001100	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	08
Employee 11	001100	001100	001100	001100	001100	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	001100	14
Full-Time Employees															
Employee 01	000000	000011	000011	000011	000011	000000	000000	000011	000011	000011	000000	000011	000011	000011	20
Employee 02	000000	001100	001100	001100	001100	000000	000000	001100	001100	000000	001100	001100	001100	001100	20
Employee 03	000011	000011	000000	000011	000011	000011	000011	000000	000011	000011	000011	000011	000000	000000	20
Employee 04	001100	000000	001100	001100	001100	000000	000000	001100	001100	001100	000000	001100	001100	001100	20
Employee 05	001100	001100	000000	001100	001100	001100	001100	000000	001100	001100	001100	001100	000000	000000	20
Employee 06	110000	000000	110000	110000	110000	000000	000000	110000	110000	110000	110000	000000	110000	110000	20
Employee 07	110000	110000	000000	110000	110000	000000	000000	110000	110000	110000	110000	000000	110000	110000	20
Working Employees	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	
Required Workforce	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	
Total schedule Cost : \$11876,00															

TABLE 9 – Horaire initiale ayant un ratio employés temps plein / employés temps partiel de 0.39.

Schedule Day	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	Worked Periods
Part-Time Employees															
Employee 01	000000	000000	000000	000000	000000	000011	000011	000000	000000	000011	000000	000011	000000	000000	08
Employee 02	000000	000000	000000	000000	000000	001100	001100	001100	001100	000000	000000	000000	000000	000000	08
Employee 03	000000	000000	000000	000011	000011	000011	000011	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	08
Employee 04	000000	000000	000000	001100	000000	000000	000000	000000	000000	001100	000000	000000	001100	001100	08
Employee 05	000000	000000	001100	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	000000	001100	001100	001100	08
Employee 06	000000	000000	110000	000000	000000	110000	110000	000000	000000	000000	110000	000000	000000	000000	08
Employee 07	000000	001100	001100	000000	001100	001100	001100	000000	000000	000000	001100	001100	000000	000000	14
Employee 08	000011	000000	000000	000000	000000	000011	000011	000000	000000	000011	000000	000000	000000	000000	08
Employee 09	001100	001100	000000	000000	001100	001100	001100	001100	000000	000000	001100	000000	000000	000000	14
Employee 10	110000	000000	000000	000000	000000	110000	110000	000000	000000	000000	110000	000000	000000	000000	08
Full-Time Employees															
Employee 01	000000	000011	000011	000011	000011	000000	000000	000011	000011	000000	000011	000011	000011	000011	20
Employee 02	000000	110000	110000	110000	110000	000000	000000	110000	110000	110000	000000	110000	110000	110000	20
Employee 03	000011	000011	000011	000000	000011	000000	000000	000011	000011	000000	000011	000011	000011	000011	20
Employee 04	000011	000011	000011	000011	000000	000000	000000	000011	000011	000011	000011	000000	000011	000011	20
Employee 05	001100	000000	001100	001100	001100	000000	000000	001100	001100	001100	001100	000000	001100	001100	20
Employee 06	001100	001100	000000	001100	001100	001100	001100	000000	001100	001100	001100	001100	000000	000000	20
Employee 07	001100	001100	001100	001100	000000	000000	000000	001100	001100	001100	000000	001100	001100	001100	20
Employee 08	110000	110000	000000	110000	110000	000000	000000	110000	110000	110000	000000	110000	110000	110000	20
Working Employees	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	
Required Workforce	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	
Total schedule Cost : \$11716,00															

TABLE 10 – Horaire initiale ayant un ratio employés temps plein / employés temps partiel de 0.44.

Schedule Day	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	Worked Periods
Part-Time Employees															
Employee 01	000000	000000	000000	000000	110000	110000	110000	000000	000000	000000	110000	000000	000000	000000	08
Employee 02	000000	000000	000000	000000	110000	110000	110000	000000	000000	000000	110000	000000	000000	000000	08
Employee 03	000000	001100	000000	000000	000000	001100	001100	000000	000000	001100	000000	000000	000000	000000	08
Employee 04	000011	000000	000000	000000	000000	000011	000011	000000	000000	000000	000000	000000	000011	000000	08
Employee 05	000011	000000	000000	000000	000000	000011	000011	000000	000000	000000	000000	000000	000011	000000	08
Employee 06	000011	000000	000000	000000	000000	000011	000011	000000	000000	000000	000000	000000	000011	000000	08
Employee 07	001100	000000	000000	000000	000000	001100	001100	000000	000000	001100	000000	000000	000000	000000	08
Employee 08	001100	000000	000000	000000	000000	001100	001100	000000	000000	001100	000000	000000	000000	000000	08
Employee 09	001100	000000	000000	000000	000000	001100	001100	000000	000000	001100	000000	000000	000000	000000	08
Full-Time Employees															
Employee 01	000000	000011	000011	000011	000011	000000	000000	000011	000011	000011	000011	000000	000011	000011	20
Employee 02	000000	000011	000011	000011	000011	000000	000000	000011	000011	000011	000011	000000	000011	000011	20
Employee 03	000000	000011	000011	000011	000011	000000	000000	000011	000011	000011	000011	000000	000011	000011	20
Employee 04	000000	001100	001100	001100	001100	000000	000000	001100	001100	000000	001100	001100	001100	001100	20
Employee 05	000000	001100	001100	001100	001100	000000	000000	001100	001100	000000	001100	001100	001100	001100	20
Employee 06	000000	001100	001100	001100	001100	000000	000000	001100	001100	000000	001100	001100	001100	001100	20
Employee 07	001100	000000	001100	001100	001100	000000	000000	001100	001100	000000	001100	001100	001100	001100	20
Employee 08	110000	110000	110000	110000	000000	000000	000000	110000	110000	110000	000000	110000	110000	110000	20
Employee 09	110000	110000	110000	110000	000000	000000	000000	110000	110000	110000	000000	110000	110000	110000	20
Working Employees	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	
Required Workforce	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	224433	
Total schedule Cost : \$11556,00															

TABLE 11 – Horaire initiale ayant un ratio employés temps plein / employés temps partiel de 0.50.

Annexe 2 : Pseudocode de l'algorithme de recouvrement des horaires

Algorithme 1 : Algorithme de recouvrement

Data : nbEmployees, maxBacktrack, nbRecoveryActions, alreadyPerformedMatrix=False,
currentRecoveredSchedule, solutionFound=0

Result : currentRecoveredSchedule

```
while  $\neg$ solutionFound  $\wedge$  nbBacktrack < maxBacktrack do
  if nbAvailRecoveryActions > 0 then
    Choose minimum cost recoveryAction
    for Employee and Work period do
      Perform recoveryAction on currentRecoveredSchedule
      Mark recoveryAction as performed in alreadyPerformed matrix
      nbRecoveryActions-1
  else
    Update currentRecoveredSchedule
    nbBacktrack+1
  if nbAvailRecoveryActions=0 then
    solutionFound=True
    if nbBacktrack mod nbEmployees = 0 then
      initialize alreadyPerformedMatrix
```
