

Approche intégrée pour des problèmes à plusieurs niveaux

Ce chapitre étend l'approche intégrée de résolution de problèmes mono-niveau de planification et d'ordonnancement de la production au cas de nomenclatures à plusieurs niveaux, dans des systèmes de production complexes de type job-shop¹. Cette méthode peut être adaptée à des scénarios mono-site et multi-sites et donc au contexte général d'approvisionnement dans une chaîne logistique. Les solutions proposées par l'approche sont réalisables au niveau opérationnel, et sont avantageuses en termes de qualité et de temps de calcul par rapport aux solveurs commerciaux.

[4.1 Introduction](#)

[4.2 Évolution du modèle](#)

[4.3 Méthode de résolution](#)

[4.4 Résultats expérimentaux](#)

[4.5 Conclusion](#)

1. Des parties de ce chapitre ont été publiées dans les conférences **MOSIM2012** [86], **IWLS2012** [85], **ROADEF2013** [89] et **IWLS2013** [90].

4.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté une nouvelle approche intégrée pour résoudre des problèmes de planification et d'ordonnancement de la production, dans des systèmes de production à un seul niveau. Nous nous intéressons ici à la résolution des problèmes à plusieurs niveaux. La différence réside dans le fait que des contraintes de production liées à la nomenclature (besoins en composants entre produits) entrent en jeu dans la problématique. Ainsi, non seulement les contraintes de capacité doivent être satisfaites afin de garantir des solutions réalisables au niveau ordonnancement, mais aussi nous devons garantir une cohérence entre les différents niveaux de production.

La synchronisation des niveaux de production est assurée en pratique, dans la plupart des cas, à travers la logique MRP qui consiste à décider des tailles de lots de façon hiérarchique, niveau par niveau, en commençant par les produits les plus agrégés (produits finis ou produits sans successeurs). De cette façon, la taille du lot d'un produit est contrainte par les tailles des lots de ses successeurs directs dans la nomenclature. Bien que le calcul MRP garantit le respect des besoins en matières de tous les produits, il n'existe aucune garantie sur la qualité de la solution, l'optimalité n'étant pas le but de la procédure. Ceci et le fait que la capacité n'est pas intégrée correctement dans le processus de décision conduisent souvent à des coûts supplémentaires non négligeables pour la gestion de la chaîne logistique.

Face à ce constat, nous proposons dans ce qui suit une approche intégrée pour résoudre le problème multi-niveaux de dimensionnement de lots et d'ordonnancement, dans des systèmes de production complexes avec configurations d'atelier de type job-shop. Nous commençons dans la Section 4.2 par introduire les nouvelles notations nécessaires pour la modélisation des problèmes multi-niveaux et par présenter l'évolution du modèle mathématique par rapport au cas mono-niveau. Ensuite, dans la Section 4.3, nous proposons une méthode de résolution. Dans la Section 4.4, nous évaluons la performance de l'approche en réalisant des comparaisons avec le solveur commercial IBM ILOG CPLEX. Pour finir, nous présentons les conclusions dans la Section 4.5.

4.2 Évolution du modèle

4.2.1 Description du problème

Comme dans le chapitre précédent, nous nous intéressons à la résolution du problème intégré de planification et d'ordonnancement de la production dans des ateliers multi-ressources de type

job-shop. Cependant, nous considérons ici des structures de nomenclature établissant des liens ou des besoins de production entre les produits, c'est-à-dire des problèmes multi-niveaux. De manière plus générale, ceci peut correspondre à des chaînes logistiques comprenant différents sites de production, chaque site fabricant des composants différents pour satisfaire les demandes internes d'autres sites, ainsi que les demandes externes.

De manière similaire à l'approche pour des problème mono-niveau, le but est de planifier la production de N produits sur R machines et T périodes en déterminant les dates de début et de fin des O opérations nécessaires pour la fabrication des produits. Les hypothèses considérées pour l'approche du chapitre précédent restent valables. Néanmoins, nous considérons que les produits peuvent avoir besoin de certains composants (d'autres produits) dans leur processus de fabrication.

Le problème d'ordonnancement est à nouveau représenté par un graphe disjonctif, où les opérations sont liées par des contraintes de précédence associées aux gammes de fabrication et à l'utilisation des ressources. Ce graphe reste inchangé par rapport au graphe d'un problème mono-niveau puisqu'il n'y a pas d'arcs de précédence entre les couples *composant-composé*.

En plus des données décrites dans le chapitre précédent, nous utilisons par la suite les données suivantes :

- d_{il} : demande externe du produit i à la fin de la période l ,
- D_{il} : demande totale du produit i à la fin de la période l ,
- e_i : coût unitaire d'échelon stock du produit i ,
- $\mathcal{DS}(i)$: ensemble des successeurs directs du produit i dans la nomenclature,
- $\mathcal{AS}(i)$: ensemble de tous les successeurs du produit i dans la nomenclature,
- $\mathcal{DP}(i)$: ensemble des prédécesseurs directs du produit i dans la nomenclature,
- $\mathcal{AP}(i)$: ensemble de tous les prédécesseurs du produit i dans la nomenclature,
- g_{ij} : nombre d'unités du produit i requises pour produire une unité du produit j ($g_{ij} = 0$ si $j \notin \mathcal{DS}(i)$),
- n_{ij} : nombre de chemins liant les produits i et j dans la nomenclature,
- p_{ij}^n : quantité totale du produit i nécessaire pour produire une unité du produit j , en suivant le chemin n dans la nomenclature,
- $P^n(i, j)$: $n^{\text{ème}}$ chemin reliant le produit i et son successeur j ,
- $K^n(i, j)$: somme des délais d'obtention entre les produits i et $j \in \mathcal{AS}(i)$ à travers le chemin $P^n(i, j)$ dans la nomenclature,
- M_i : somme maximale des délais d'obtention du produit i ,
- $T_i + L_i$: période de production au plus tard du produit i ,
- B : nombre de niveaux de la nomenclature,

- $\mathcal{BL}(b)$: ensemble des produits appartenant au niveau b de la nomenclature.

Les **variables de décision** du problème intégré restent les mêmes (tailles des lots X_{il} et setups Y_{il}), mais nous utilisons en plus les **variables dépendantes** suivantes :

- E_{il} : échelon stock du produit i à la fin de la période l .

Ces notations ont été également utilisées par Afentakis *et al.* [8], sans prise en compte des délais d'obtention, et par Afentakis et Gavish [7], Clark et Armentano [39, 40] et Berretta *et al.* [30], avec des délais d'obtention non nuls, pour l'implémentation d'une formulation basée sur l'échelon stock. Ce concept a été introduit par Clark et Scarf [38] et nous l'expliquons plus tard dans cette section. Une différence importante entre la formulation des travaux précédents et la notre est que nous comptabilisons la production X_{il} à la période où le produit est terminé (la production de i peut commencer au plus tôt au début de la période $l - L_i + 1$ et doit se terminer à la période l). Dans les autres travaux, la production X_{il} démarre à la période l et est disponible pour consommation à la période $l + L_i$.

Définissons d'abord les notions de bases dans un contexte multi-niveaux. Suivant une nomenclature, les différents produits d'un système de production sont organisés par niveau, selon leurs liens de dépendance. Ainsi par exemple, il peut y avoir une nomenclature avec un nombre de niveaux $B = 5$, les produits appartenant au niveau 1 ($\mathcal{BL}(1)$) étant les produits finis (sans successeurs), les produits appartenant au niveau 5 ($\mathcal{BL}(5)$) étant les composants basiques (produits sans prédécesseurs) et, $\mathcal{BL}(b) \forall 1 < b < 5$ représentant les composants intermédiaires. Les produits peuvent être liés à travers de multiples chemins, n_{ij} étant le nombre de chemins entre les produits i et $j \in \mathcal{AS}(i)$.

Nous pouvons donc calculer le **nombre total d'unités** p_{ij}^n du produit i nécessaire pour fabriquer une unité du produit j , en suivant le chemin $P^n(i, j)$, avec l'expression suivante :

$$p_{ij}^n = \prod_{k \in P^n(i, j) - j} g_{k, s^n(k)} \quad (4.1)$$

Un facteur important à prendre en compte dans un problème multi-niveaux est le délai d'obtention. En fait, pour fabriquer le composant i à la période l , nous devons garantir que tous les prédécesseurs directs ($\mathcal{DP}(i)$) de i sont disponibles dès le début de la période $l - L_i + 1$. Nous commençons par calculer la **somme des délais** $K^n(i, j)$ pour obtenir les composants du produit j à partir du produit i , en suivant le chemin $P^n(i, j)$.

$$K^n(i, j) = \sum_{k \in P^n(i, j) - j} L_k \quad (4.2)$$

Nous devons aussi déterminer la **somme maximale de délais** M_i pour obtenir tous les composants du produit i . Une manière récursive d'obtenir cette valeur est donnée par l'équation suivante :

$$M_i = \begin{cases} 0, & \text{si } i \text{ est un composant basique} \\ \max_{j \in \mathcal{DP}(i)} (M_j + L_j), & \text{si } i \text{ n'est pas un composant basique} \end{cases} \quad (4.3)$$

Le produit i peut être fabriqué à partir de la période $M_i + L_i$ (période de fin de production), et au plus tard à la période $T_i + L_i$, T_i étant calculée de manière récursive avec l'équation suivante pour le cas d'une nomenclature avec un seul produit fini représenté par l'indice 1 ([39]).

$$T_i = M_1 - \max_{n=1, \dots, n_{i1}} \{K^n(i, 1)\} \quad (4.4)$$

Nous étendons l'expression au cas général avec j produits finis, comme suit :

$$T_i = \min_{j \in \mathcal{AS}(i); j \in \mathcal{BL}(1)} \left\{ M_j - \max_{n=1, \dots, n_{ij}} [K^n(i, j)] \right\} \quad (4.5)$$

$T_i + L_i$ est en effet la **dernière période** à laquelle le produit i peut être fabriqué, afin de pouvoir produire $j \in \mathcal{AS}(i)$ à la période $M(j) + L_j$. Suivre une stratégie de production à la période $T_i + L_i \forall i \in \{1, \dots, N\}$ correspond à une logique de planification descendante (comme dans l'approche MRP), c'est-à-dire les composants sont produits à la période qui permet de fabriquer un produit successeur, et pas avant, évitant ainsi de générer de niveaux de stocks inutiles. Clark et Armentano [39, 40] et Berretta *et al.* [30] utilisent $T_i + 1$ comme période de démarrage de la production du produit $i \in \{1, \dots, N\}$ (dans notre cas il s'agit de $T_i + L_i$, car nous comptabilisons la production à la période de fin). Si cette condition n'est pas nécessaire pour assurer l'obtention de la solution optimale, car il suffit de permettre la fabrication du produit i à partir de $M_i + 1$ ($M_i + L_i$ dans notre cas), elle permet de borner l'horizon de planification de chaque produit, réduisant la taille de l'espace des solutions. Néanmoins, il peut s'avérer indispensable d'autoriser la production à partir de $M_i + L_i$ comme période initiale pour la production de i , car il peut être impossible, dans certains cas, de produire à la période $T_i + L_i$, tout en respectant la capacité. Les périodes comprises entre $M_i + L_i$ et $T_i + L_i - 1$ donnent une marge de manœuvre pour la répartition de la production à cet effet. De plus, s'il existe une demande externe d_{il} pour le produit i à la période l , avec $M_i + L_i \leq l < T_i + L_i$, elle doit être satisfaite.

Nous considérons comme hypothèse que $I_{i,0} = 0 \forall i \in \{1, \dots, N\}$. Donc, $X_{i,l} = 0 \forall l < M_i + L_i, \forall i \in \{1, \dots, N\}$, i.e. la production du produit i n'est possible qu'à partir de la période $M_i + L_i$.

Exemple : calcul de $p_{ij}^n, K^n(i, j), M_i$ et T_i

Nous présentons sur la Figure 4.1 un exemple de nomenclature à 4 niveaux et 7 produits. Chaque nœud correspond à un produit i , et les chiffres sur les arcs correspondent aux valeurs de $g_{ij} \forall i, \forall j \in \mathcal{DS}(i)$. Nous observons qu'il existe 3 chemins pour obtenir le produit 1 à partir du produit 5, qui sont : $P^1(5, 1)$, $P^2(5, 1)$ et $P^3(5, 1)$. Nous pouvons donc calculer les valeurs de p_{ij}^n comme suit : $p_{51}^1 = 3 \times 1 = 3$, $p_{51}^2 = 3 \times 2 = 6$ et $p_{51}^3 = 3 \times 1 = 3$. Nous pouvons également calculer les sommes des délais d'obtention liées à ces trois chemins comme suit : $K^1(5, 1) = 2 + 4 = 6$, $K^2(5, 1) = 2 + 1 = 3$ et $K^3(5, 1) = 2 + 2 = 4$. La même logique peut être utilisée pour obtenir les autres valeurs de p_{ij}^n et $K^n(i, j)$.

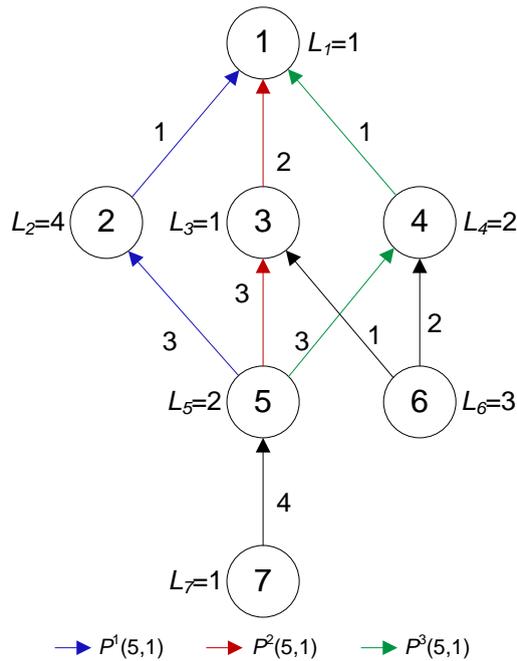


FIGURE 4.1 – Exemple de nomenclature

Les délais maximum sont obtenus comme suit :

- $M_7 = 0, M_6 = 0,$
- $M_5 = M_7 + L_7 = 1,$

- $M_4 = \max(M_5 + L_5, M_6 + L_6) = 3$,
- $M_3 = \max(M_5 + L_5, M_6 + L_6) = 3$,
- $M_2 = M_5 + L_5 = 3$ et
- $M_1 = \max(M_2 + L_2, M_3 + L_3, M_4 + L_4) = 7$.

Ainsi, la production du produit 1 ne peut être réalisée qu'à partir de la période 8 ($M_1 + L_1$), à moins qu'il y ait suffisamment de stock de composants directs à une période précédente. Le calcul de $T_i \forall i$ est présenté ci-dessous.

- $T_1 = M_1 - 0 = 7$,
- $T_2 = M_1 - K^1(2, 1) = 3$,
- $T_3 = M_1 - K^1(3, 1) = 6$,
- $T_4 = M_1 - K^1(4, 1) = 5$,
- $T_5 = M_1 - \max\{K^1(5, 1), K^2(5, 1), K^3(5, 1)\} = 1$,
- $T_6 = M_1 - \max\{K^1(6, 1), K^2(6, 1)\} = 2$ et
- $T_7 = M_1 - \max\{K^1(7, 1), K^2(7, 1), K^3(7, 1)\} = 0$

Constatons que la production des produits 1, 2, 5 et 7 peut être réalisée uniquement aux périodes 8, 7, 3 et 1 respectivement ; tandis que celle des produits 3, 4 et 6 peut être réalisée entre les périodes 4 et 7, 5 et 7 et 3 et 5 respectivement.

Échelon stock et demande d'échelon

L'**échelon stock** $E_{i,l}$ du produit i à la période l est défini dans la littérature comme la quantité de matière de i , existante à l , en tant que produit fini ou en tant que composant, pour satisfaire la demande externe $d_{i,l}$ et interne $\sum_{j \in \mathcal{DS}(i)} g_{ij} D_{j,l+L_j}$. En revanche, l'inventaire $I_{i,l}$ est la quantité de matières vraiment disponible. Il varie en fonction des tailles de lots des successeurs directs $\mathcal{DS}(i)$, et non pas en fonction de la demande interne, comme défini par l'équation suivante :

$$I_{i,l} = I_{i,l-1} + X_{il} - d_{i,l} - \sum_{j \in \mathcal{DS}(i)} g_{ij} X_{j,l+L_j} \quad (4.6)$$

Il y a deux façons d'exprimer l'échelon stock du produit i à la période l , soit en fonction de l'inventaire de tous les successeurs de i avec (4.7), soit de manière récursive en fonction de l'échelon stock des successeurs directs de i avec (4.8).

$$E_{il} = I_{i,l} + \sum_{j \in \mathcal{AS}(i)} \sum_{n=1}^{n_{ij}} p_{ij}^n I_{j,l+L_j+K^n(i,j)} \quad (4.7)$$

$$E_{il} = I_{i,l} + \sum_{j \in \mathcal{DS}(i)} g_{ij} E_{j,l+L_j} \quad (4.8)$$

Comme l'inventaire I_{il} et l'échelon stock E_{il} ne sont pas équivalents, le coût unitaire de stockage du produit i n'est pas égal au coût unitaire d'échelon stock de i . Ce dernier, noté e_i , est défini par l'équation suivante :

$$e_i = c_i^{inv} - \sum_{j \in \mathcal{DP}(i)} c_j^{inv} g_{ji} \quad (4.9)$$

La **demande d'échelon** ou demande totale du produit i à la période l est égale à la somme de ses demandes externes et internes. La définition récursive de la demande est modélisée avec (4.10), et l'expression non-récursive avec (4.11).

$$D_{il} = d_{i,l} + \sum_{j \in \mathcal{DS}(i)} g_{ij} D_{j,l+L_j} \quad (4.10)$$

$$D_{il} = d_{i,l} + \sum_{j \in \mathcal{AS}(i)} \sum_{n=1}^{n_{ij}} p_{ij}^n D_{j,l+L_j+K^n(i,j)} \quad (4.11)$$

4.2.2 Modèle intégré avec notation classique

Le modèle mathématique que nous considérons pour le problème multi-niveaux intégré est celui proposé par Dauzère-Pérès et Lasserre [48], avec la différence que nous ne considérons pas la rupture de stocks. La différence entre cette formulation et celle que nous avons employée pour la modélisation du problème mono-niveau réside dans les contraintes d'équilibre des stocks. Pour tenir compte des liens de production entre les produits, le paramètre g_{ij} permettant de calculer la demande interne de chaque produit est introduit. La formulation du problème intégré est la suivante :

$$\min \sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^T (c_i^p X_{il} + c_i^{inv} I_{il} + c_i^s Y_{il}) \quad (3.4)$$

s.c.

$$I_{il} = I_{i,l-1} + X_{il} - d_{il} - \sum_{j \in \mathcal{DS}(i)} g_{ij} X_{j,l+L_j} \quad \forall i, l \quad (4.12)$$

$$t(o') \geq t(o) + p_o^u X_{i(o),l(o)} + s_o^t Y_{i(o),l(o)} \quad \forall (o, o') \in \mathcal{A} \quad (3.1)$$

$$\begin{cases} t(o) \geq t(o') + p_{o'}^u X_{i(o'),l(o')} + s_{o'}^t Y_{i(o'),l(o')} \\ \text{ou} \\ t(o') \geq t(o) + p_o^u X_{i(o),l(o)} + s_o^t Y_{i(o),l(o)} \end{cases} \quad \forall (o, o') \in \mathcal{E} \quad (3.2)$$

$$t(o) + p_o^u X_{i(o),l(o)} + s_o Y_{i(o),l(o)} \leq \sum_{l=1}^{l(o)} c_l \quad \forall o \in \mathcal{L} \quad (3.6)$$

$$t(o) + p_o^u X_{i(o),l(o)} + s_o Y_{i(o),l(o)} \geq \sum_{l=1}^{l(o)-1} c_l \quad \forall o \in \mathcal{L} \quad (3.7)$$

$$t(o) \geq \sum_{l=1}^{l(o)-L_{i(o)}} c_l \quad \forall o \in \mathcal{F} \text{ et } L_{i(o)} > 0 \quad (3.8)$$

$$X_{il} \leq \left(\sum_{k=1}^T D_{ik} \right) Y_{il} \quad \forall i, l \quad (3.9)$$

$$X_{il}, I_{il} \geq 0 \quad \forall i, l \quad (3.10)$$

$$Y_{il} \in \{0, 1\} \quad \forall i, l \quad (3.11)$$

$$t(o) \geq 0 \quad \forall o \quad (3.12)$$

$$X_{il} = 0 \quad \forall i; \forall l < M_i + L_i \quad (4.13)$$

De nombreuses contraintes du modèle sont les mêmes que pour le problème à un seul niveau (voir Section 3.2 du Chapitre 3). Nous avons uniquement modifié les contraintes d'équilibre des stocks (4.12), pour tenir compte de l'aspect multi-niveaux, et ajouté les contraintes (4.13), qui garantissent qu'il n'est pas possible de déclencher la production d'un produit i à une période l si la somme maximale des délais d'obtention du produit i n'est pas supérieure à l .

Comme dans le cas des problèmes à un seul niveau, il est très compliqué de résoudre un tel modèle. De plus, les nouvelles variables de décision ($X_{jl} \forall j \in \mathcal{DS}(i), \forall l$) introduisent une

difficulté supplémentaire, car elles empêchent d'utiliser la propriété de Wagner et Whitin pour la décomposition du problème en plusieurs sous-problèmes mono-produit.

4.2.3 Modèle intégré avec échelon stock

Pour réduire le nombre de variables de décision et rendre le problème décomposable par produit, nous utilisons les variables d'échelon stock et de demande d'échelon, qui permettent de remplacer les variables d'inventaire et les tailles de lot des produits successeurs respectivement. Pour garantir l'approvisionnement en composants, des contraintes de nomenclature liant l'échelon stock de chaque produit avec ceux de ses successeurs sont aussi ajoutées.

$$\min \sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^T (c_i^p X_{il} + e_i E_{il} + c_i^s Y_{il}) \quad (4.14)$$

s.c.

$$E_{il} = E_{i,l-1} + X_{il} - D_{il} \quad \forall i, l \quad (4.15)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{DS}(i)} g_{ij} E_{j,l+L_j} - E_{il} \leq 0 \quad \forall i, l \quad (4.16)$$

$$t(o') \geq t(o) + p_o^u X_{i(o),l(o)} + s_o^t Y_{i(o),l(o)} \quad \forall (o, o') \in \mathcal{A} \quad (3.1)$$

$$\begin{cases} t(o) \geq t(o') + p_{o'}^u X_{i(o'),l(o')} + s_{o'}^t Y_{i(o'),l(o')} \\ \text{ou} \\ t(o') \geq t(o) + p_o^u X_{i(o),l(o)} + s_o^t Y_{i(o),l(o)} \end{cases} \quad \forall (o, o') \in \mathcal{E} \quad (3.2)$$

$$t(o) + p_o^u X_{i(o),l(o)} + s_o Y_{i(o),l(o)} \leq \sum_{l=1}^{l(o)} c_l \quad \forall o \in \mathcal{L} \quad (3.6)$$

$$t(o) + p_o^u X_{i(o),l(o)} + s_o Y_{i(o),l(o)} \geq \sum_{l=1}^{l(o)-1} c_l \quad \forall o \in \mathcal{L} \quad (3.7)$$

$$t(o) \geq \sum_{l=1}^{l(o)-L_{i(o)}} c_l \quad \forall o \in \mathcal{F} \text{ et } L_{i(o)} > 0 \quad (3.8)$$

$$X_{il} \leq \left(\sum_{k=1}^T D_{ik} \right) Y_{il} \quad \forall i, l \quad (3.9)$$

$$X_{il}, E_{il} \geq 0 \quad \forall i, l \quad (4.17)$$

$$Y_{il} \in \{0, 1\} \quad \forall i, l \quad (3.11)$$

$$t(o) \geq 0 \quad \forall o \quad (3.12)$$

$$X_{il} = 0 \quad \forall i; \forall l < M_i + L_i \quad (4.13)$$

La fonction objectif du modèle est représentée par (4.14), qui correspond à la minimisation du coût total, i.e. la somme des coûts de production, d'échelon stock et de setup. Les contraintes d'équilibre des stocks sont modélisées par (4.15). Les contraintes (4.16) correspondent aux contraintes de nomenclature ou de type BOM (Bill Of Materials). Les contraintes (4.17) forcent les variables de tailles de lots et d'échelon stock à prendre des valeurs strictement positives. Les autres contraintes sont identiques à celles du modèle utilisant les notations classiques de la Section 3.2 du Chapitre 3.

4.2.4 Modèle avec chemins, échelon stock et séquence fixée

Nous adoptons la même stratégie que nous avons utilisée pour la résolution des problèmes à un seul niveau, qui consiste à décomposer le problème en un sous-ensemble de problèmes de planification à séquence fixée. Néanmoins, cette fois-ci nous utilisons les notations d'échelon stock, ce qui conduit à la formulation suivante :

$$\min \sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^T (c_i^s Y_{il} + c_i^p X_{il} + e_i E_{il}) \quad (4.14)$$

s.a.

$$E_{i,l-1} + X_{il} - E_{i,l} = D_{i,l} \quad \forall i, l \quad (4.15)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{DS}(i)} g_{ij} E_{j,l+L_j} - E_{il} \leq 0 \quad \forall i, l \quad (4.16)$$

$$r(o_c^f) + \sum_{o \in c} (p_o^u X_{i(o)l(o)} + s_o^t Y_{i(o)l(o)}) \leq \sum_{l=1}^{l(o_c^f)} c_l \quad \forall c \in \mathcal{C}(y) \quad (3.25)$$

$$X_{il} \leq \left(\sum_{k=l}^T D_{ik} \right) Y_{il} \quad \forall i, l \quad (3.9)$$

$$X_{il}, E_{il} \geq 0 \quad \forall i, l \quad (4.17)$$

$$Y_{il} = \{0, 1\} \quad \forall i, l \quad (3.11)$$

$$X_{il} = 0 \quad \forall i; \forall l < M_i + L_i \quad (4.13)$$

Hormis la nouvelle fonction objectif (4.14), les nouvelles contraintes d'équilibre de stocks (4.15) et de nomenclature (4.16), nous retrouvons les contraintes de capacité détaillées (3.25) introduites dans la Section 3.2.3 du Chapitre 3, qui permettent d'assurer la faisabilité du plan de production au niveau ordonnancement. Le modèle est complété par les contraintes de production (3.9) liant les variables de décision X et Y , les contraintes de non-négativité (4.17), les contraintes (3.11) forçant les variables de setup à être binaires et les contraintes (4.13) empêchant de fabriquer un produit si son approvisionnement en composants n'est pas garanti.

4.3 Méthode de résolution

Dans les problèmes mono-niveau, la difficulté majeure est au niveau de la validation des contraintes de capacité détaillées, dont le nombre est exponentiel. La relaxation de ces contraintes

conduit à des plans de production qui ne sont pas forcément réalisables, et un lissage de la production est dans la plupart des cas nécessaire afin de les rendre réalisables. En ce qui concerne le contexte des problèmes multi-niveaux, un nouvel obstacle apparaît : la validation des contraintes de nomenclature. Tout comme le cas mono-niveau, le problème multi-niveaux de dimensionnement de lots et d'ordonnancement est \mathcal{NP} -difficile. À cause de la difficulté de résolution, très peu de travaux de dimensionnement de lots avec contraintes de capacité détaillées ont été traités dans la littérature. Particulièrement, les problèmes à plusieurs ressources ont été rarement étudiés, et encore moins ceux qui intègrent des décisions d'ordonnancement.

Nous utilisons la même stratégie de résolution que pour les problèmes à un seul niveau, c'est-à-dire l'application itérative d'une heuristique Lagrangienne pour la résolution du problème de planification avec séquence fixée combinée à une méthode d'amélioration de la séquence.

4.3.1 Heuristique Lagrangienne pour la résolution du problème avec séquence fixée

Nous relâchons les contraintes de nomenclature en plus de celles de capacité, idée aussi mise en œuvre par Tempelmeier et Derstroff [215], et nous utilisons la méthode de sous-gradients pour la mise à jour des multiplicateurs Lagrangiens. Une nouvelle fois, nous combinons la relaxation Lagrangienne avec l'algorithme de programmation dynamique de dimensionnement de lots, proposé par Wagelmans *et al.* [230], ce qui fait que les valeurs de variables de décision varient en fonction des valeurs des multiplicateurs Lagrangiens. Étant donné que deux types de contraintes sont relâchés, le plan de production proposé à chaque itération n'est pas, dans la plupart des cas, réalisable au niveau ordonnancement. La solution correspond à une borne inférieure $LB(y)$ du problème de dimensionnement de lots avec séquence fixée y . Afin de valider les contraintes non satisfaites, nous proposons plusieurs stratégies de lissage de la production, permettant de déterminer un plan de production réalisable, dont le coût correspond à une borne supérieure UB du problème intégré.

Dans ce qui suit, nous décrivons les principales parties de l'heuristique Lagrangienne. Une version simplifiée de l'algorithme est illustrée dans la Figure 4.2.

4.3.1.1 Déterminer un plan de production optimal avec des contraintes de capacité et de nomenclature relâchées

Les multiplicateurs Lagrangiens associés aux contraintes de capacité sont mis à jour de la même manière que pour les problèmes à un seul niveau (voir Section 3.3 du Chapitre 3), c'est-à-

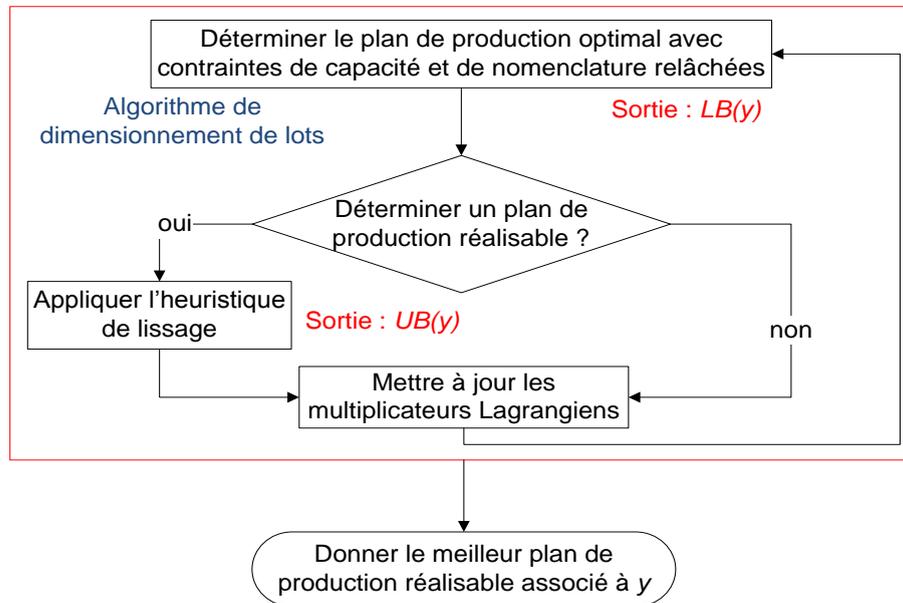


FIGURE 4.2 – Heuristique Lagrangienne pour des problèmes de dimensionnement de lots à plusieurs niveaux

dire qu'à chaque itération, uniquement les chemins les plus violés $\mathcal{CH}(y)$ sont considérés. En ce qui concerne les contraintes de nomenclature, un multiplicateur Lagrangien $\gamma_{i,l}$ est défini pour chaque job (i, l) , et ils sont tous mis à jour à chaque itération.

Le coût du plan de production obtenu à la première itération correspond à la *borne inférieure absolue* (ALB) du problème intégré, qui est calculée quand tous les multiplicateurs Lagrangiens sont à zéro, c'est-à-dire que le plan de production résout de façon optimale le problème mono-niveau de dimensionnement de lots sans contraintes de capacité. La plus grande borne inférieure obtenue par l'heuristique Lagrangienne correspond à la meilleure borne inférieure ($LB^*(y)$) pour le problème avec séquence y fixée. La valeur de $LB(y)$ est obtenue en évaluant la fonction objectif du problème dual ci-dessous :

$$\begin{aligned}
F(X, Y, \beta, \gamma) = \min \sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^T & \left\{ \left(c_i^s + \sum_{c \in \mathcal{C}(y)} \beta_c + \sum_{o \in c} s_o^t \right) Y_{il} \right. \\
& + \left[c_i^p + \sum_{k=l}^T (e_i - \gamma_{ik}) + \sum_{c \in \mathcal{C}(y)} \beta_c \sum_{o \in c} p_o^u \right] X_{il} \left. \right\} \\
& + \sum_{c \in \mathcal{C}(y)} \beta_c \left[r(o_c^f) - \sum_{l=1}^{l(o_c^l)} c_l \right] - \sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^T \sum_{k=1}^T (e_i - \gamma_{ik}) D_{il} \\
& + \sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^T \sum_{j \in \mathcal{DS}(i)} \sum_{k=l}^T \gamma_{il} g_{ij} X_{j,l+L_j} \\
& + \sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^T \sum_{j \in \mathcal{DS}(i)} \sum_{k=l}^T \gamma_{il} g_{ij} D_{j,l+L_j}
\end{aligned} \tag{4.18}$$

Le simplification de la fonction objectif relâchée jusqu'à obtenir (4.18), qui dépend uniquement des variables de décision, est détaillée dans l'Annexe A de ce manuscrit. À partir de cette expression, nous pouvons identifier le coût dynamique $C_Y(\beta)$ à utiliser dans l'algorithme de Wagelmans *et al.* [230] pour faire varier les décisions de setup. Ce coût est calculé avec l'équation suivante :

$$C_Y(\beta) = c_i^s + \sum_{c \in \mathcal{C}(y)} \beta_c \sum_{o \in c} s_o^t \tag{4.19}$$

Pour obtenir le coût dynamique $C_X(\beta, \gamma)$ modifiant les tailles de lots, une transformation de la fonction objectif relâchée est nécessaire. En fait, d'après (4.18), les tailles de lot des produits successeurs ont une influence sur la solution du problème dual. Les décisions concernant les tailles de lots ne peuvent donc pas être prises de manière isolée (sans tenir compte des liens de nomenclature). Pour que les décisions soient cohérentes, l'information liant composants et composés doit être considérée dans le coût dynamique sur la taille de lot de chaque produit. Nous pouvons réécrire la fonction objectif du problème dual comme suit :

$$\begin{aligned}
F(X, Y, \beta, \gamma) = \min \sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^T \left\{ \left(c_i^s + \sum_{c \in \mathcal{C}(y)} \beta_c + \sum_{o \in c} s_o^t \right) Y_{il} \right. \\
+ \left[c_i^p + \sum_{k=l}^T (e_i - \gamma_{ik}) + \sum_{c \in \mathcal{C}(y)} \beta_c \sum_{o \in c} p_o^u + \sum_{j \in \mathcal{DP}(i)} \sum_{k=l-L_j}^{T-L_j} \gamma_{jk} g_{ji} \right] X_{il} \Big\} \\
+ \sum_{c \in \mathcal{C}(y)} \beta_c \left[r(o_c^f) - \sum_{l=1}^{l(o_c^l)} c_l \right] - \sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^T \sum_{k=1}^T (e_i - \gamma_{ik}) D_{il} \\
+ \sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^T \sum_{j \in \mathcal{DS}(i)} \sum_{k=l}^T \gamma_{il} g_{ij} D_{j,l+L_j}
\end{aligned} \tag{4.20}$$

À partir de cette dernière expression, nous pouvons identifier $C_X(\beta, \gamma)$, défini par l'équation suivante :

$$C_X(\beta, \gamma) = c_i^p + \sum_{k=l}^T (e_i + \gamma_{ik}) + \sum_{c \in \mathcal{C}(y)} \beta_c \sum_{o \in c} p_o^u + \sum_{j \in \mathcal{DP}(i)} \sum_{k=l-L_j}^{T-L_j} \gamma_{jk} g_{ji} \tag{4.21}$$

4.3.1.2 Heuristique de lissage de la production

Le but de cette procédure est de réaliser tous les mouvements nécessaires pour réparer les contraintes de capacité et de nomenclature qui sont violées à une itération donnée de la relaxation Lagrangienne. Les objectifs de production sont modifiés, en déplaçant la production vers des périodes qui ont de la marge de capacité. Le coût du nouveau plan de production correspond à une *borne supérieure* (*UB*). Plusieurs heuristiques de lissage ont été conçues et testées et sont présentées dans ce que suit.

L'algorithme utilisé pour satisfaire les contraintes de capacité est le même que pour les problèmes mono-niveau (voir section 3.3.1.2 du Chapitre 3), mais la quantité de transfert peut être limitée au respect des contraintes de nomenclature. En revanche, pour satisfaire les contraintes de nomenclature, nous proposons trois algorithmes différents : un algorithme glouton, un algorithme descendant et un algorithme ascendant. Le couplage de la procédure réparant les contraintes de capacité et celle réparant les contraintes de nomenclature est possible au moyen de 5 stratégies. La première stratégie, nommée **SP1**, et schématisée dans la Figure 4.3, consiste à satisfaire en premier complètement les contraintes de capacité, sans violer ou sans augmenter le degré de violation (avec restriction) des contraintes de nomenclature. Une fois que les

contraintes de capacité ont toutes été validées, les contraintes de nomenclature sont réparées sans violer (avec restriction) les contraintes de capacité. Des restrictions sont donc imposées sur les deux types de mouvement.

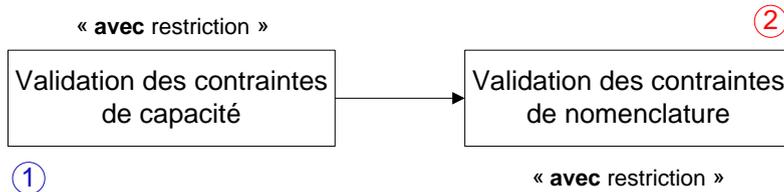


FIGURE 4.3 – Stratégie de lissage SP1

Inversement, avec la stratégie **SP2**, illustrée sur la Figure 4.4, nous cherchons à valider en premier toutes les contraintes de nomenclature, sans violer ou sans augmenter le degré de violation des contraintes de capacité et, une fois que les contraintes de nomenclature sont satisfaites, nous cherchons à valider les contraintes de capacité, sans violer les autres contraintes.

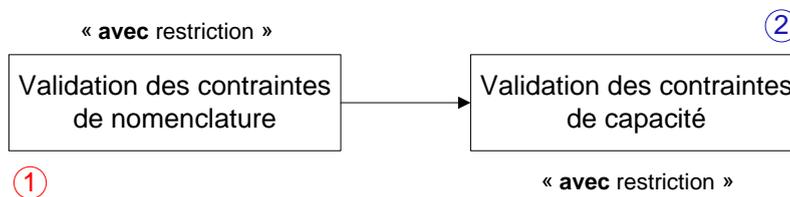


FIGURE 4.4 – Stratégie de lissage SP2

Nous avons constaté que la condition de non-violation de l'autre type de contrainte pouvait rendre très restrictif les mouvements possibles. C'est pourquoi nous avons testé deux nouvelles procédures, nommées **SP3** et **SP4**, qui sont illustrées sur les Figures 4.5 et 4.6, et qui autorisent la violation (si nécessaire) du deuxième type de contrainte (sans restriction). Puis, une fois que toutes les contraintes du premier type sont satisfaites, on cherche à valider les autres contraintes, cette fois-ci avec la condition de non-violation (avec restriction) pour ne pas revenir à des solutions non-réalisables.

Pour diminuer le degré de restriction des mouvements, nous proposons la stratégie **SP5** qui comporte deux étapes principales (Figure 4.7). La première étape a pour but de permettre la réalisation des mouvements sans restriction, c'est-à-dire que l'on cherche à satisfaire les contraintes de nomenclature sans se préoccuper des contraintes de capacité et vice-versa. Dans

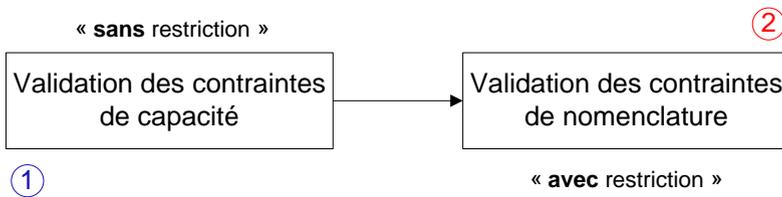


FIGURE 4.5 – Stratégie de lissage SP3

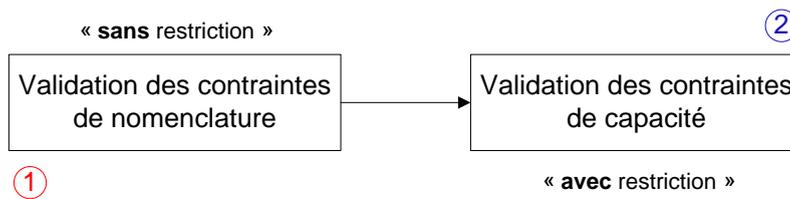


FIGURE 4.6 – Stratégie de lissage SP4

la deuxième étape, la restriction de non-violation des contraintes est utilisée pour chercher à construire une solution réalisable.

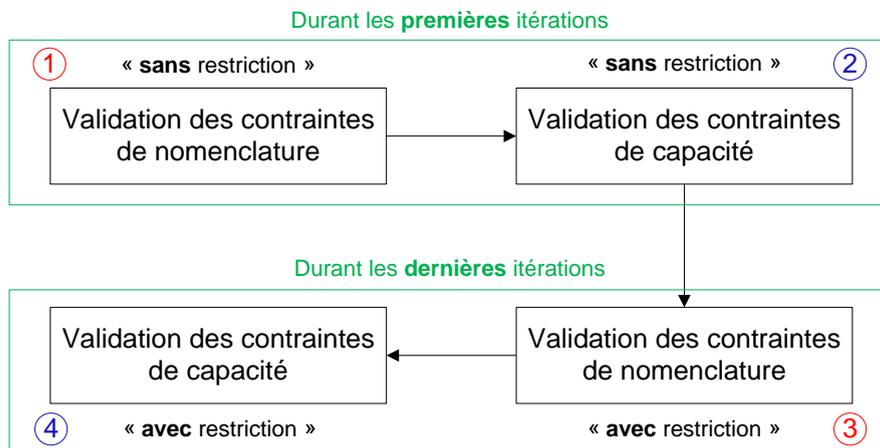


FIGURE 4.7 – Stratégie de lissage SP5

Algorithme glouton

Cette procédure, illustrée sur la Figure 4.8, consiste à identifier à chaque itération la contrainte la plus violée et à réaliser le mouvement diminuant le degré de violation avec le

coût unitaire le plus petit. Pour satisfaire une contrainte de nomenclature, il est possible de modifier la taille de lot du produit critique, en déplaçant une quantité de production d'avant en arrière dans l'horizon de planification (vers une période plus tard), ou de modifier la taille des lots de certains successeurs, en réalisant un mouvement de production d'arrière en avant (vers une période plus récente). Pour ce faire, tous les mouvements possibles sont testés. Puis, le mouvement avec le coût unitaire le plus petit est effectué. La procédure s'arrête une fois que toutes les contraintes de nomenclature sont respectées, ou lorsqu'il n'est plus possible de faire des mouvements.

La **quantité de transfert** est calculée comme suit. D'abord, définissons l_c , l_s et l_d comme étant la période critique (celle où se trouve le produit critique), la période source (d'où l'on enlève de la production) et la période destination (vers où l'on transfère la production) respectivement. Dans la procédure réparant les contraintes de capacité, $l_c = l_s$; tandis que dans la procédure réparant les contraintes de nomenclature, l_c et l_s ne sont pas forcément les mêmes.

La quantité de transfert cherchant à valider les contraintes de capacité, **sans respecter** les contraintes de nomenclature (SP3), est déterminée de la façon suivante :

– Si $l_s < l_d$:

1. Nous calculons avec (4.22) la quantité maximale $Q_1(i)$ du produit critique i qui peut être déplacée sans causer une rupture d'échelon stock entre les périodes concernées par le transfert.

$$Q_1(i) = \max \left[0, \min_{l_s+1 \leq l < l_d} (E_{i,l_s-1} + X_{i,l_s} - D_{i,l_s}, E_{il}) \right] \quad (4.22)$$

2. Nous calculons avec (4.23) la quantité de transfert Q_{i,l_s,l_d} du produit i , de la période l_s vers la période l_d , respectant la condition précédente, la quantité limite de production et la marge de capacité (déterminée avec (3.30)).

$$Q_{i,l_s,l_d} = \min (Q_1(i), X_{i,l_s}, \text{marge}) \quad (4.23)$$

- Si $l_s > l_d$, l'équilibre d'échelon stock est toujours respecté. La quantité de transfert Q_{i,l_s,l_d} doit simplement garantir que la quantité limite de production et la marge de capacité ne sont pas dépassées.

$$Q_{i,l_s,l_d} = \min (X_{i,l_s}, \text{marge}) \quad (4.24)$$

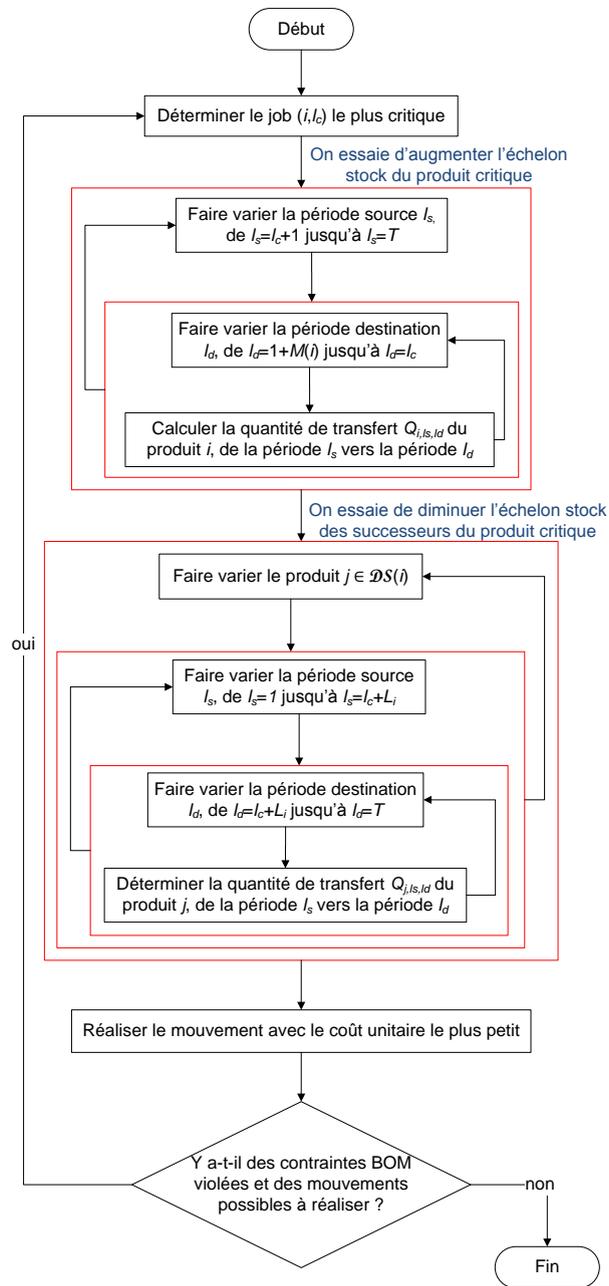


FIGURE 4.8 – Algorithme glouton pour satisfaire les contraintes de nomenclature

La quantité de transfert réparant les contraintes de nomenclature, **sans respecter** les contraintes de capacité (SP4), est déterminée de la façon suivante.

– Si $l_s < l_d$ (déplacement d'un successeur $j \in \mathcal{DS}(i)$ du produit critique i) :

1. Nous calculons avec (4.25) la quantité maximale $Q_2(j)$ de j qu'il est possible à transférer sans violer la contrainte de nomenclature liant i et $\mathcal{DS}(i)$ entre l_s et l_d .

$$Q_2(j) = \max \left[0, \min_{l_s \leq l < l_d} \left(E_{j,l} - \sum_{z \in \mathcal{DS}(j)} g_{jz} E_{z,l+L_z} \right) \right] \quad (4.25)$$

2. Nous calculons avec (4.26) la quantité maximale $Q_1(j)$ qui peut être déplacée de façon à ne pas créer de rupture d'échelon stock de j sur aucune des périodes comprises dans l'intervalle $[l_s + 1, l_d - 1]$.

$$Q_1(j) = \max \left[0, \min_{l_s+1 \leq l < l_d} (E_{j,l_s-1} + X_{j,l_s} - D_{j,l_s}, E_{j,l}) \right] \quad (4.26)$$

3. Finalement, nous calculons avec (4.27) la quantité de transfert Q_{j,l_s,l_d} , du produit j , de la période l_s vers la période l_d , qui respecte ces deux conditions.

$$Q_{j,l_s,l_d} = \min (Q_1(j), Q_2(j), X_{j,l_s}) \quad (4.27)$$

– Si $l_s > l_d$ (déplacement du produit critique i) :

1. Pour chaque prédécesseur j du produit i , nous calculons avec (4.28) la quantité maximale $Q^j(i)$ de i qui peut être déplacée vers la période destination, sans créer de rupture de stock sur j .

$$Q^j(i) = \max \left(0, \frac{E_{j,l_d-L_i}}{g_{ji}} - E_{i,l_d} - \sum_{z \in \mathcal{DS}(j); z \neq i} \frac{g_{jz}}{g_{ji}} E_{z,l_d} \right), \forall j \in \mathcal{DP}(i) \quad (4.28)$$

2. Nous calculons avec (4.29) la quantité de transfert Q_{i,l_s,l_d} , du produit i , de la période l_s vers la période l_d , respectant la condition précédente et la quantité limite de production.

$$Q_{i,l_s,l_d} = \min_{j \in \mathcal{DP}(i)} (Q^j(i), X_{i,l_s}) \quad (4.29)$$

Si l'on souhaite **respecter les contraintes** qui ne font pas l'objet de validation (dans les étapes « sans restriction »), qu'il s'agisse de la capacité (SP2) ou de la nomenclature (SP1), la quantité de transfert Q_{j,l_s,l_d} du produit j , de la période l_s vers la période l_d , est déterminée comme suit :

– Si $l_s < l_d$:

$$Q_{j,l_s,l_d} = \min(Q_1(j), Q_2(j), X_{j,l_s}, marge) \quad (4.30)$$

où $j \in \mathcal{DS}(i)$, avec i étant le produit critique, si le but est de réparer les contraintes de nomenclature. En revanche, si le but est de réparer les contraintes de capacité, j est le produit critique.

– Si $l_s > l_d$:

$$Q_{j,l_s,l_d} = \min_{j \in \mathcal{DP}(i)} (Q^j(i), X_{i,l_s}, marge) \quad (4.31)$$

où i est le produit critique.

Algorithme descendant

Cette procédure suit une structure décisionnelle similaire à la construction du plan MRP, c'est-à-dire que les tailles de lots des produits sont modifiées pour satisfaire les objectifs de production des successeurs directs. La procédure est réalisée de haut en bas, niveau par niveau, et seuls les prédécesseurs peuvent être modifiés, comme illustré sur la Figure 4.9. Cette stratégie permet de construire une solution respectant les contraintes de nomenclature plus rapidement que l'algorithme glouton.

La façon de calculer la quantité de transfert pour réparer les contraintes de capacité reste la même. En ce qui concerne la validation des contraintes de nomenclature, les mouvements de production sont réalisés d'avant en arrière ($l_s > l_d$) comme suit :

1. Nous calculons avec (4.32) la quantité $Q_3(i)$ du produit i nécessaire pour satisfaire la contrainte de nomenclature liant i et $\mathcal{DS}(i)$.

$$Q_3(i) = \max \left(0, \sum_{j \in \mathcal{DS}(i)} g_{ij} E_{j,l_d+L_j} - E_{i,l_d} \right) \quad (4.32)$$

2. Nous calculons la quantité de production Q_{i,l_s,l_d} du produit i à déplacer de la période l_s vers la période l_d , avec (4.33) si l'on interdit la violation des contraintes de capacité, ou avec (4.34) sinon.

$$Q_{i,l_s,l_d} = \min(Q_3(i), X_{i,l_s}, marge) \quad (4.33)$$

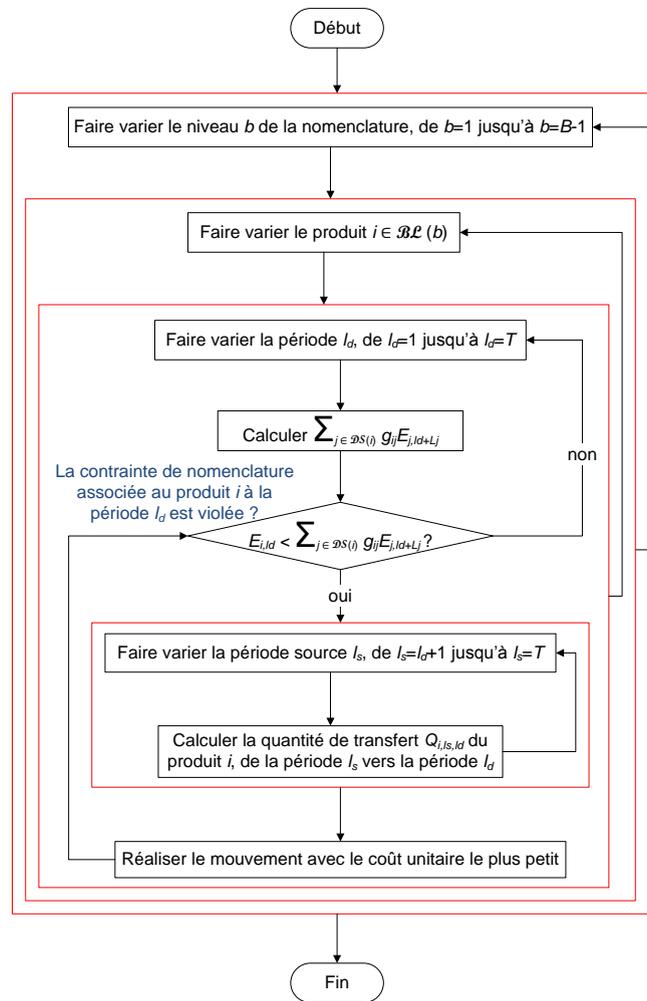


FIGURE 4.9 – Algorithme descendant pour satisfaire les contraintes de nomenclature

$$Q_{i, l_s, l_d} = \min (Q_3(i), X_{i, l_s}) \quad (4.34)$$

Algorithme ascendant

Dans cette procédure, présentée sur la Figure 4.10, les mouvements sont effectués de bas en haut, niveau par niveau, en modifiant uniquement les tailles de lots des successeurs directs. Contrairement à l'algorithme descendant, où les décisions sur les prédécesseurs peuvent être facilement subordonnées aux décisions sur les successeurs, dans une logique de bas en haut, les modifications sur un successeur doivent tenir compte des décisions sur tous ses prédécesseurs.

Les quantités à transférer pour satisfaire les contraintes de capacité sont calculées comme expliqué précédemment. En ce qui concerne la validation des contraintes de nomenclature, les transferts de production sont réalisés d'arrière en avant ($l_s < l_d$) comme suit :

1. Nous calculons avec (4.35) la quantité $Q_4(j)$ de $j \in \mathcal{DS}(i)$ nécessaire à déplacer pour réparer la contrainte de nomenclature associée au produit critique i à la période critique l_c .

$$Q_4(j) = \max \left(0, \frac{\sum_{z \in \mathcal{DS}(i)} g_{iz} E_{z,l_s} - E_{i,l_s - L_z}}{g_{ij}} \right) \quad (4.35)$$

où $l_s = l_c + L_i$.

2. Nous calculons avec (4.36) la quantité maximale $Q_5(j)$ de $j \in \mathcal{DS}(i)$ à transférer pour ne pas créer de rupture d'échelon stock.

$$Q_5(j) = \max \left[0, \min_{l_s+1 \leq p < l_d} (E_{j,l_s-1} + X_{j,l_s} - D_{j,l_s}, E_{j,p}) \right] \quad (4.36)$$

où $l_s < l_d \leq T$.

3. La quantité de transfert Q_{j,l_s,l_d} du produit j de la période l_s vers la période l_d est finalement calculée avec (4.37) si l'on interdit la violation des contraintes de capacité, ou avec (4.38) sinon.

$$Q_{j,l_s,l_d} = \min (Q_4(j), Q_5(j), X_{j,l_s}, \text{marge}) \quad (4.37)$$

$$Q_{j,l_s,l_d} = \min (Q_4(j), Q_5(j), X_{j,l_s}) \quad (4.38)$$

4.3.2 Méthode d'amélioration de la séquence

De la même manière que pour les problèmes à un seul niveau, nous utilisons ici une méthode pour améliorer la séquence suivant l'algorithme présenté dans la Section 3.3.2 du Chapitre 3. Nous nous intéressons donc aux changements de l'orientation des arcs du graphe conjonctif les plus violés durant la relaxation Lagrangienne, en utilisant l'information provenant des multiplicateurs Lagrangiens associés aux contraintes de capacité. L'objectif est de trouver une nouvelle séquence, permettant de mieux répartir la production, pour réduire le degré de violation des

contraintes de capacité. Nous ne nous intéressons donc pas pour l'instant à une sélection de la séquence basée sur les contraintes de nomenclature.

Nous connaissons l'information relative au degré de violation des contraintes de nomenclature, mais il n'y a pas d'arcs dans le graphe conjonctif liant les produits par rapport à la nomenclature. Il est difficile alors de prévoir l'impact du changement d'un arc sur les contraintes de nomenclature. C'est pourquoi nous construisons le voisinage uniquement par rapport à l'information concernant la capacité. Cependant, pour des futurs travaux, nous envisageons la construction de voisinages autour des liens composant-composé dont les contraintes de nomenclature sont violées.

La procédure de construction du voisinage et les critères de sélection de l'arc à changer à chaque itération restent donc identiques à ceux de l'approche pour des problèmes mono-niveau.

4.4 Résultats expérimentaux

Afin de tester l'efficacité de l'approche intégrée pour résoudre des problèmes multi-niveaux, nous comparons sa performance à celle du solveur commercial IBM ILOG CPLEX Optimization Studio 12.6, et nous comparons également les différentes stratégies et heuristiques de lissage présentées dans la section précédente. Pour ce faire, nous réalisons des expérimentations résolvant le problème de dimensionnement de lots avec séquence fixée et le problème intégré. L'approche intégrée a été implémentée sur Microsoft Visual C++ 2010 Express, et les expérimentations ont été réalisées avec un ordinateur présentant les caractéristiques suivantes : système d'exploitation de 64 bits (Microsoft Windows 7), processeur Intel core i7 4 Quad @2.0GHz et 8GB de mémoire RAM.

Les systèmes étudiés correspondent à des ateliers de type job-shop, avec 6 produits, 6 opérations par produit et 6 machines (6x6) et avec 10 produits, 10 opérations par produit et 10 machines (10x10). Nous considérons des horizons de planification avec 5, 10 et 20 périodes et des demandes externes sur tous les produits. De nombreuses expérimentations ont été réalisées en faisant varier la capacité par période, permettant de mesurer l'impact de ce paramètre au niveau ordonnancement.

4.4.1 Expérimentations avec des ateliers de type job-shop 6x6

Nous étudions 4 nomenclatures différentes avec 6 produits, chacun ayant besoin du traitement de 6 opérations sur 6 machines différentes. Les paramètres généraux utilisés pour construire les instances sont affichés dans le Tableau 4.1. Ces paramètres restent fixes pour

toutes les expérimentations, et nous faisons varier la valeur du ratio de capacité cap (défini dans la Section 3.5 du Chapitre 3) pour chaque instance, permettant d’obtenir des longueurs de période c_l différentes. Dans ce cas, la demande utilisée pour la génération de la capacité (3.40) est la demande d’échelon.

Nomenclature	c_i^s	d_{il}	L_i	c_i^p	c_i^{inv}
6x6-1	60	[0, 15]	1	4	[1, 15]
6x6-2	100	[0, 15]	1	4	[1, 25]
6x6-3	100	[0, 15]	1	4	[1, 15]
6x6-4	60	[0, 15]	1	4	[1, 15]

TABLEAU 4.1 – Paramètres généraux associés aux ateliers de type job-shop 6x6

4.4.1.1 Nomenclature 6x6-1

Dans la nomenclature 6x6-1 (Figure 4.11), nous avons trois niveaux et six produits, avec un produit sans successeurs et deux produits sans prédécesseurs. Dans le Tableau 4.2, nous présentons les solutions obtenues par le solveur IBM ILOG CPLEX, avec une limite de temps de 60 secondes, pour 13 instances où varient le ratio cap et le nombre de périodes T . Nous affichons la valeur de la borne inférieure absolue ALB , la solution du problème de dimensionnement de lots pour une séquence fixée y donnée $CPL1$, et la solution du problème intégré $CPL2$. Nous constatons que le solveur commercial arrive à résoudre de façon optimale toutes les instances.

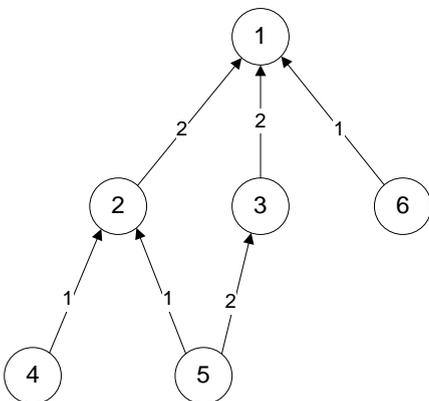


FIGURE 4.11 – Nomenclature 6x6-1

Instance	cap	T	ALB	$CPL1$	$CPL2$
1	0.60	5	4474	4724*	4715*
2	0.65			4715*	4715*
3	0.70			4690*	4690*
4	0.75			4690*	4690*
5	0.80			4690*	4690*
6	0.65	10	9965	10550*	10441*
7	0.70			10447*	10438*
8	0.75			10438*	10438*
9	0.80			10416*	10416*
10	0.65	20	22796	24113*	24074*
11	0.70			23960*	23970*
12	0.75			23908*	23874*
13	0.80			23904*	23874*

TABLEAU 4.2 – Solutions obtenues avec IBM ILOG CPLEX pour la nomenclature 6x6-1

Application de l'algorithme glouton

Les résultats de notre approche pour le problème à séquence fixée et pour le problème intégré, en utilisant l'algorithme glouton pour la validation des contraintes de nomenclature, sont présentés dans le Tableau 4.3. G est l'écart (en pourcentage) entre la borne supérieure UB obtenue par notre approche et la solution $CPL1$ pour le problème à séquence fixée et $CPL2$ pour le problème intégré fournie par le solveur, t est le temps de calcul exprimé en secondes pour le problème à séquence fixée et A est le pourcentage d'amélioration de la borne supérieure du problème à séquence fixée, lorsque l'on résout le problème intégré avec une limite de temps de 60 secondes.

Problème à séquence fixée															
Instance	SP1			SP2			SP3			SP4			SP5		
	UB	G	$t(s)$	UB	G	$t(s)$	UB	G	$t(s)$	UB	G	$t(s)$	UB	G	$t(s)$
1	4725	0.02	0.30	4724*	0.00	0.23	4832	2.29	0.40	4724*	0.00	0.22	4832	2.29	0.39
2	4715*	0.00	1.10	4715*	0.00	0.33	4715*	0.00	0.38	4715*	0.00	0.32	4715*	0.00	0.45
3	4690*	0.00	0.34	4690*	0.00	0.32	4690*	0.00	0.34	4690*	0.00	0.32	4690*	0.00	0.33
4	4690*	0.00	0.33	4690*	0.00	0.32	4690*	0.00	0.34	4690*	0.00	0.31	4690*	0.00	0.34
5	4690*	0.00	0.33	4690*	0.00	0.31	4690*	0.00	0.34	4690*	0.00	0.32	4690*	0.00	0.34
6	10637	0.82	8.21	10624	0.70	2.65	10646	0.91	1.16	10650	0.95	3.07	10646	0.91	2.11
7	10448	0.01	3.29	10519	0.69	1.42	10575	1.23	1.78	10519	0.69	1.36	10575	1.23	3.04
8	10440	0.02	1.07	10438*	0.00	0.70	10438*	0.00	1.45	10438*	0.00	0.72	10438*	0.00	1.14
9	10438	0.21	0.76	10490	0.71	1.00	10438	0.21	0.88	10490	0.71	1.05	10438	0.21	0.98
10	24410	1.23	40.96	24390	1.15	23.12	24398	1.18	24.79	24390	1.15	17.37	25028	3.79	49.78
11	24262	1.26	19.16	24205	1.02	21.80	24398	1.83	24.93	24205	1.02	17.12	24179	0.91	45.19
12	24141	0.97	22.83	24077	0.71	21.06	24130	0.93	24.41	24057	0.62	17.14	24062	0.64	47.30
13	24170	1.11	23.20	24178	1.15	26.56	24166	1.10	28.06	24069	0.69	21.11	24072	0.70	48.55

Problème intégré															
Instance	SP1			SP2			SP3			SP4			SP5		
	UB	G	A												
1	4720	0.11	0.11	4724	0.19	0.00	4832	2.48	0.00	4724	0.19	0.00	4832	2.48	0.00
2	4715*	0.00	0.00	4715*	0.00	0.00	4715*	0.00	0.00	4715*	0.00	0.00	4715*	0.00	0.00
3	4690*	0.00	0.00	4690*	0.00	0.00	4690*	0.00	0.00	4690*	0.00	0.00	4690*	0.00	0.00
4	4690*	0.00	0.00	4690*	0.00	0.00	4690*	0.00	0.00	4690*	0.00	0.00	4690*	0.00	0.00
5	4690*	0.00	0.00	4690*	0.00	0.00	4690*	0.00	0.00	4690*	0.00	0.00	4690*	0.00	0.00
6	10532	0.87	0.99	10532	0.87	0.87	10646	1.96	0.00	10581	1.34	0.65	10646	1.96	0.00
7	10438*	0.00	0.10	10438*	0.00	0.77	10575	1.31	0.00	10438*	0.00	0.77	10438*	0.00	1.30
8	10438*	0.00	0.02	10438*	0.00	0.00	10438*	0.00	0.00	10438*	0.00	0.00	10438*	0.00	0.00
9	10438	0.21	0.00	10438	0.21	0.50	10438	0.21	0.00	10438	0.21	0.50	10438	0.21	0.00
10	24338	1.10	0.29	24384	1.29	0.02	24398	1.35	0.00	24390	1.31	0.00	25028	3.96	0.00
11	24243	1.14	0.08	24199	0.96	0.02	24229	1.08	0.69	24199	0.96	0.02	24179	0.87	0.00
12	24133	1.08	0.03	24057	0.77	0.08	24110	0.99	0.08	24057	0.77	0.00	24062	0.79	0.00
13	24062	0.79	0.45	24033	0.67	0.60	24166	1.22	0.00	24069	0.82	0.00	24072	0.83	0.00

TABLEAU 4.3 – Résultats pour la nomenclature 6x6-1 avec l'algorithme glouton

En ce qui concerne le problème à séquence fixée, les solutions avec toutes les stratégies de lissage sont bonnes, avec un écart maximum de 3.79% pour SP5. Notre approche trouve aussi plusieurs solutions optimales (dont la plupart pour $T = 5$), et les temps de calcul sont faibles, excepté pour $T = 20$, où plusieurs itérations de l'heuristique de lissage sont nécessaires afin

de construire une solution réalisable. Parmi toutes les stratégies de lissage, SP4 propose une meilleure performance globale. SP1 présente le meilleur écart moyen ($\bar{G} = 0.44\%$), mais la différence avec SP4 ($\bar{G} = 0.45\%$) n'est pas significative. De plus, SP4 domine sur l'écart-type moyen ($\sigma_{\bar{G}} = 0.46$) et présente l'écart maximum le plus petit ($G_{max} = 1.15\%$). En termes de temps de calcul, c'est aussi SP4 qui domine globalement. La stratégie la moins performante est SP5, aussi bien en qualité de solution qu'en temps de calcul.

Si nous comparons le fait d'autoriser ou d'interdire la violation des contraintes qui ne sont pas validées à la première étape, nous constatons qu'entre SP2 et SP4 (procédures commençant par satisfaire les contraintes de nomenclature) il n'y a pas une différence significative sur la qualité des solutions (SP4 domine légèrement), mais l'impact est plus visible sur le temps de calcul. Le fait d'autoriser la violation des contraintes de capacité permet de construire un plan de production respectant les contraintes de nomenclature plus rapidement, et cet avantage est maintenu jusqu'à la fin de l'exécution. Entre SP1 et SP3, la différence sur la qualité des solutions est un peu plus importante, SP3 offrant une performance moins intéressante, avec un écart moyen de 0.74% . Quant au temps de calcul, le fait de permettre la violation des contraintes de nomenclature durant la validation des contraintes de capacité a globalement une influence positive.

Concernant le problème intégré, c'est la stratégie SP2 qui génère globalement la plus grande amélioration des bornes supérieures. SP2 domine SP1 en performance, avec un écart moyen de 0.38% contre 0.41% pour SP1. La stratégie SP4 offre aussi une bonne performance, avec $\bar{G} = 0.43\%$. De plus, 6 solutions optimales sont obtenues avec SP1, SP2, SP4 et SP5, et 5 avec SP3.

Application de l'algorithme descendant

Résolvons maintenant les mêmes instances, en utilisant l'algorithme descendant pour réparer les contraintes de nomenclature. Les résultats sont présentés dans le Tableau 4.4.

Nous observons que la qualité des solutions est fortement détériorée par rapport à l'approche utilisant l'algorithme glouton. En fait, les bornes supérieures affichées correspondent aux solutions initiales où $X_{il} = D_{il} \forall i, l$, car l'heuristique de lissage est incapable, dans la plupart des cas, de construire une solution réalisable. Ce comportement a deux causes. Premièrement, à travers les stratégies commençant par satisfaire les contraintes de nomenclature (SP2 et SP4), une solution respectant ces contraintes est rapidement construite en suivant la logique MRP. Le plan de production résultant privilégie fortement les décisions associées aux produits finis, et l'importance des décisions descend niveau par niveau jusqu'à la planification des composants

Problème à séquence fixée															
Instance	SP1			SP2			SP3			SP4			SP5		
	UB	G	t(s)	UB	G	t(s)	UB	G	t(s)	UB	G	t(s)	UB	G	t(s)
1	5032	8.64	4.04	5032	8.64	0.43	5032	8.64	2.57	5032	8.64	0.25	5032	8.64	0.48
2	5032	8.88	3.58	5032	8.88	0.43	5032	8.88	3.00	5032	8.88	0.30	5032	8.88	0.46
3	5032	10.41	0.95	5032	10.41	0.41	5032	10.41	0.99	5032	10.41	0.28	5032	10.41	0.42
4	5032	10.89	1.20	5032	10.89	0.48	5032	10.89	1.20	5032	10.89	0.30	5032	10.89	0.47
5	5032	12.23	1.24	4732	5.54	0.46	5032	12.23	1.31	4696	4.74	0.28	4732	5.54	0.43
6	11136	8.04	9.48	11136	8.04	1.23	11136	8.04	14.57	11136	8.04	1.12	11136	8.04	1.47
7	11136	8.03	29.06	11136	8.03	1.78	11136	8.03	30.26	11136	8.03	1.58	11136	8.03	1.95
8	11136	8.01	16.83	11136	8.01	1.67	11136	8.01	24.69	11136	8.01	1.50	11136	8.01	1.84
9	11136	7.92	25.47	11136	7.92	1.83	11136	7.92	26.60	11087	7.45	1.47	11136	7.92	1.77
10	25028	5.94	95.45	25028	5.94	7.71	25028	5.94	123.52	25028	5.94	8.30	25028	5.94	17.31
11	25028	5.78	84.77	25028	5.78	7.55	25028	5.78	105.51	25028	5.78	9.22	25028	5.78	13.16
12	25028	5.74	84.78	25028	5.74	7.63	25028	5.74	107.98	25028	5.74	11.09	25028	5.74	13.36
13	25028	5.69	71.36	25028	5.69	8.67	25028	5.69	98.78	25028	5.69	11.39	25028	5.69	10.97

Problème intégré															
Instance	SP1			SP2			SP3			SP4			SP5		
	UB	G	A												
1	5032	6.72	0.00	5032	6.72	0.00	5032	6.72	0.00	5032	6.72	0.00	5032	6.72	0.00
2	5032	6.72	0.00	5032	6.72	0.00	5032	6.72	0.00	5032	6.72	0.00	5032	6.72	0.00
3	5032	7.29	0.00	5032	7.29	0.00	5032	7.29	0.00	5032	7.29	0.00	5032	7.29	0.00
4	5032	7.29	0.00	5032	7.29	0.00	5032	7.29	0.00	5032	7.29	0.00	5032	7.29	0.00
5	4789	2.11	4.83	4696	0.13	0.76	5032	7.29	0.00	4696	0.13	0.00	4732	0.90	0.00
6	11136	6.66	0.00	11136	6.66	0.00	11136	6.66	0.00	11136	6.66	0.00	11136	6.66	0.00
7	11136	6.69	0.00	11136	6.69	0.00	11136	6.69	0.00	11136	6.69	0.00	11136	6.69	0.00
8	11136	6.69	0.00	11136	6.69	0.00	11136	6.69	0.00	11082	6.17	0.48	11136	6.69	0.00
9	11136	6.91	0.00	11136	6.91	0.00	11136	6.91	0.00	11052	6.11	0.32	11136	6.91	0.00
10	25028	3.96	0.00	25028	3.96	0.00	25028	3.96	0.00	25028	3.96	0.00	25028	3.96	0.00
11	25028	4.41	0.00	25028	4.41	0.00	25028	4.41	0.00	25028	4.41	0.00	25028	4.41	0.00
12	25028	4.83	0.00	25028	4.83	0.00	25028	4.83	0.00	25028	4.83	0.00	25028	4.83	0.00
13	25028	4.83	0.00	25028	4.83	0.00	25028	4.83	0.00	25028	4.83	0.00	25028	4.83	0.00

TABLEAU 4.4 – Résultats pour la nomenclature 6x6-1 avec l’algorithme descendant

de base qui sont complètement subordonnés aux autres composants. Par conséquent, le plan de production est très chargé sur peu de périodes afin de satisfaire les besoins des successeurs. Comme le volume de production est naturellement plus important pour les composants faisant partie du niveau le plus bas de la nomenclature, la capacité dans les premières périodes devient fortement violée. Il est ensuite très difficile de réparer les contraintes de capacité sans violer les contraintes de nomenclature. Deuxièmement, si l’on commence par satisfaire les contraintes de capacité, un plan respectant ces contraintes est construit, mais il devient problématique de trouver une solution respectant la nomenclature sans violer la capacité. La procédure est en effet très peu flexible, contrairement à l’algorithme glouton qui teste plusieurs mouvements.

Cet algorithme a été conçu pour privilégier la satisfaction des contraintes de nomenclature, ce qui explique la différence sur les temps de calcul. Les stratégies qui valident en premier les contraintes de nomenclature (SP2 et SP4) consomment beaucoup moins de temps que celles qui commencent par réparer les contraintes de capacité (SP1 et SP3).

Concernant le problème intégré, très peu d'améliorations sont effectuées par rapport au problème avec séquence fixée. Même si la séquence est changée, la logique descendante restreint l'application d'un lissage efficace. Une amélioration importante est néanmoins obtenue sur l'instance 5 avec SP1. SP4 s'avère être la stratégie la plus performante avec un écart moyen final de 5.52% sur la valeur de la solution optimale.

Comme l'algorithme descendant a un comportement similaire pour toutes les autres nomenclatures, nous ne présentons pas les résultats lui étant associé dans le reste de ce chapitre. Néanmoins, ils peuvent être consultés dans l'Annexe B.

Application de l'algorithme ascendant

Les résultats changent grandement lorsque les contraintes de nomenclature sont réparées au moyen de l'algorithme ascendant (logique opposée à MRP), comme nous pouvons l'observer dans le Tableau 4.5.

Problème à séquence fixée															
Instance	SP1			SP2			SP3			SP4			SP5		
	UB	G	t(s)	UB	G	t(s)	UB	G	t(s)	UB	G	t(s)	UB	G	t(s)
1	4725	0.02	1.72	4724*	0.00	0.26	4832	2.29	0.28	4724*	0.00	0.25	4832	2.29	0.36
2	4715*	0.00	0.78	4715*	0.00	0.31	4715*	0.00	0.36	4715*	0.00	0.30	4715*	0.00	0.37
3	4690*	0.00	0.41	4690*	0.00	0.24	4690*	0.00	0.27	4690*	0.00	0.24	4690*	0.00	0.31
4	4690*	0.00	0.41	4690*	0.00	0.25	4690*	0.00	0.27	4690*	0.00	0.24	4690*	0.00	0.31
5	4690*	0.00	0.41	4690*	0.00	0.24	4690*	0.00	0.26	4690*	0.00	0.25	4690*	0.00	0.3
6	10637	0.82	5.44	10637	0.82	3.61	10646	0.91	0.76	10637	0.82	4.26	10646	0.91	1.20
7	10500	0.51	0.91	10519	0.69	0.98	10627	1.72	0.87	10519	0.69	0.90	10627	1.72	1.62
8	10490	0.50	0.56	10509	0.68	0.79	10490	0.50	0.72	10509	0.68	0.75	10509	0.68	0.85
9	10492	0.73	0.63	10509	0.89	0.81	10490	0.71	0.53	10492	0.73	0.77	10490	0.71	0.81
10	24394	1.17	14.26	24394	1.17	5.12	24394	1.17	6.94	24394	1.17	3.71	24394	1.17	15.32
11	24367	1.70	5.19	24310	1.46	5.16	24394	1.81	7.64	24310	1.46	3.76	24316	1.49	15.86
12	24308	1.67	5.00	24308	1.67	5.45	24308	1.67	6.16	24331	1.77	3.87	24307	1.67	13.68
13	24290	1.61	5.71	24288	1.61	5.82	24274	1.55	6.54	24293	1.63	4.23	24273	1.54	18.36

Problème intégré															
Instance	SP1			SP2			SP3			SP4			SP5		
	UB	G	A	UB	G	A	UB	G	A	UB	G	A	UB	G	A
1	4720	0.11	0.11	4719	0.08	0.11	4832	2.48	0.00	4724	0.19	0.00	4832	2.48	0.00
2	4715*	0.00	0.00	4715*	0.00	0.00	4715*	0.00	0.00	4715*	0.00	0.00	4715*	0.00	0.00
3	4690*	0.00	0.00	4690*	0.00	0.00	4690*	0.00	0.00	4690*	0.00	0.00	4690*	0.00	0.00
4	4690*	0.00	0.00	4690*	0.00	0.00	4690*	0.00	0.00	4690*	0.00	0.00	4690*	0.00	0.00
5	4690*	0.00	0.00	4690*	0.00	0.00	4690*	0.00	0.00	4690*	0.00	0.00	4690*	0.00	0.00
6	10557	1.11	0.75	10532	0.87	0.99	10646	1.96	0.00	10637	1.96	0.00	10646	1.96	0.00
7	10490	0.50	0.10	10490	0.50	0.28	10490	0.50	1.29	10519	1.99	0.00	10490	0.50	1.29
8	10490	0.50	0.00	10490	0.50	0.18	10490	0.50	0.00	10438*	0.00	0.68	10490	0.50	0.18
9	10490	0.71	0.02	10490	0.71	0.18	10490	0.71	0.00	10492	0.74	0.00	10490	0.71	0.00
10	24388	1.30	0.02	24388	1.30	0.02	24394	1.33	0.00	24394	1.33	0.00	24394	1.33	0.00
11	24310	1.42	0.23	24306	1.40	0.02	24394	1.77	0.00	24310	1.69	0.00	24312	1.43	0.02
12	24308	1.82	0.00	24269	1.65	0.16	24307	1.81	0.00	24331	2.18	0.00	24285	1.72	0.09
13	24278	1.69	0.05	24268	1.65	0.08	24268	1.65	0.02	24293	2.18	0.00	24268	1.65	0.02

TABLEAU 4.5 – Résultats pour la nomenclature 6x6-1 avec l'algorithme ascendant

Cette méthode permet de répartir la production des produits des niveaux les plus bas tout au long de l'horizon de planification, sans être contraint par les tailles de lots des successeurs, ce qui fait que la charge de travail est mieux équilibrée. En effet, en tenant compte du fait que la plupart des unités produites correspondent aux composants basiques, il convient de décider de leurs tailles de lots et de leurs périodes de production avant que les décisions soient très contraintes par la nomenclature et que l'on soit obligé de les regrouper dans peu de périodes. Un autre avantage est que les temps de calculs sont très faibles.

La qualité des solutions est légèrement détériorée par rapport à l'algorithme glouton pour les instances avec 10 et 20 périodes. Néanmoins, les temps de calcul moyens sont fortement réduits (entre 65.47% et 71.07% de réduction). La stratégie de lissage proposant la meilleure qualité de solution est SP1, avec $\bar{G} = 0.67\%$. SP2 et SP4 offrent tout de même une bonne performance avec $\bar{G} = 0.69\%$, cette dernière garantissant la meilleure performance par rapport au temps de calcul avec $\bar{t} = 1.81$ secondes.

Pour ce qui est de la condition d'autorisation ou d'interdiction de violation des contraintes de capacité durant la réparation des contraintes de nomenclature (SP2 et SP4), il n'y a quasiment pas de différence sur la qualité des solutions. En revanche, si l'on souhaite satisfaire en premier les contraintes de capacité, il convient d'autoriser la violation des contraintes de nomenclature. Concernant le temps de calcul, il vaut mieux autoriser la violation du deuxième type de contraintes dans la première étape de validation, c'est-à-dire privilégier SP3 et SP4 au lieu de SP1 et SP2 respectivement.

Concernant la résolution du problème intégré, c'est la stratégie SP2 qui offre globalement la meilleure performance avec $\bar{G} = 0.67\%$, contre un écart moyen de 0.70% pour SP1.

4.4.1.2 Nomenclature 6x6-2

Considérons maintenant la nomenclature 6x6-2 (Figure 4.12), où nous avons 3 niveaux et 2 produits par niveau. Chaque produit est composant des deux produits du niveau immédiatement supérieur. Il y a donc deux produits sans prédécesseurs et deux produits sans successeurs. Les solutions obtenues par le solveur commercial sont affichées dans le Tableau 4.6. Le problème à séquence fixée est résolu de façon optimale sur toutes les instances ; tandis que le problème intégré est résolu de façon optimale uniquement sur les instances avec 5 et 10 périodes.

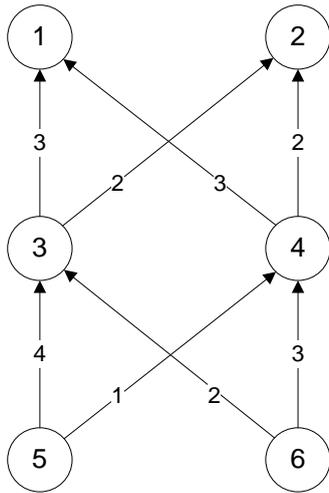


FIGURE 4.12 – Nomenclature 6x6-2

Instance	cap	T	ALB	CPL1	CPL2
1	0.60	5	10802	11884*	11884*
2	0.65			11884*	11884*
3	0.70			11884*	11884*
4	0.75			11884*	11884*
5	0.80			11884*	11884*
6	0.60	10	1913	29370*	29370*
7	0.65			29370*	29370*
8	0.70			29370*	29331*
9	0.85			29312*	29294*
10	0.80			29275*	29263*
11	0.60	20	14812	66553*	66548
12	0.65			66548*	66548
13	0.70			66536*	67073
14	0.75			66495*	66556
15	0.80			66458*	66537

TABLEAU 4.6 – Solutions obtenues avec IBM ILOG CPLEX pour la nomenclature 6x6-2

Application de l'algorithme glouton

Les résultats associés à l'algorithme glouton sont présentés dans le Tableau 4.7. Notre approche présente une très bonne performance avec les procédures qui satisfont en premier les contraintes de nomenclature (SP2, SP4, et SP5), avec $\bar{G} = 0.37\%$ pour SP2 et $\bar{G} = 0.06\%$ pour SP4 et SP5. Avec ces deux dernières stratégies, notre approche résout de façon optimale toutes les instances avec $T = 5$, ainsi que trois instances avec $T = 10$ et une instance avec $T = 20$. Les autres solutions restent très proches de l'optimum avec un écart type moyen de 0.1%. Les stratégies SP1 et SP3, qui satisfont en premier la capacité, offrent une performance un peu moins intéressante, les écarts moyens étant de 1.35% et de 1.22% respectivement. Ces deux stratégies ont des problèmes notamment sur les instances avec $T = 5$. Le temps de calcul est très variable entre toutes les stratégies, mais en moyenne SP1 est la plus rapide avec $\bar{t} = 6.11$ secondes.

Les écarts moyens par rapport aux solutions obtenues par le solveur sont encore meilleurs pour le problème intégré. De plus, les instances 13 et 14 sont mieux résolues avec notre approche qu'avec le solveur. SP4 et SP5 restent les meilleures stratégies avec un écart moyen final de 0.01%.

Problème à séquence fixée															
Instance	SP1			SP2			SP3			SP4			SP5		
	UB	G	t(s)												
1	12268	3.23	0.82	11884*	0.00	23.28	12268	3.23	0.84	11884*	0.00	19.93	11884*	0.00	0.84
2	12268	3.23	1.32	11884*	0.00	20.46	12268	3.23	1.00	11884*	0.00	18.81	11884*	0.00	1.08
3	11998	0.96	1.03	11998	0.96	19.94	11998	0.96	1.02	11884*	0.00	18.65	11884*	0.00	1.14
4	12268	3.23	1.33	11884*	0.00	21.28	12268	3.23	1.03	11884*	0.00	18.94	11884*	0.00	1.15
5	12132	2.09	1.65	11884*	0.00	20.37	12268	3.23	1.06	11884*	0.00	19.47	11884*	0.00	1.26
6	29370*	0.00	22.23	29370*	0.00	4.41	29370*	0.00	41.07	29370*	0.00	4.03	29370*	0.00	16.37
7	29708	1.15	32.54	29380	0.03	3.32	29398	0.10	14.91	29370*	0.00	2.68	29370*	0.00	14.79
8	29708	1.15	2.53	29370*	0.00	3.04	29581	0.72	5.77	29370*	0.00	2.03	29370*	0.00	8.95
9	29489	0.60	5.62	29370	0.20	2.94	29489	0.60	2.80	29370	0.20	2.32	29370	0.20	5.83
10	29708	1.48	5.24	29370	0.32	2.89	29561	0.98	7.28	29370	0.32	3.93	29370	0.32	5.62
10	66621	0.10	1.42	67227	1.01	3.48	66621	0.10	1.41	66621	0.10	0.93	66621	0.10	0.84
11	67024	0.72	8.95	67024	0.72	14.16	67020	0.71	23.76	66548*	0.00	14.37	66548*	0.00	35.46
12	67024	0.73	2.79	67024	0.73	9.55	66740	0.31	23.00	66548	0.02	5.36	66548	0.02	12.54
13	67024	0.80	2.23	67024	0.80	5.28	66820	0.49	13.95	66548	0.08	6.68	66548	0.08	13.03
14	67024	0.85	2.01	67024	0.85	7.34	66765	0.46	8.59	66548	0.14	9.89	66548	0.14	18.97

Problème intégré															
Instance	SP1			SP2			SP3			SP4			SP5		
	UB	G	A												
1	11884*	0.00	3.13	11884*	0.00	0.00	11884*	0.00	3.13	11884*	0.00	0.00	11884*	0.00	0.00
2	12268	3.23	0.00	11884*	0.00	0.00	12268	3.23	0.00	11884*	0.00	0.00	11884*	0.00	0.00
3	11998	0.96	0.00	11998	0.96	0.00	11998	0.96	0.00	11884*	0.00	0.00	11884*	0.00	0.00
4	12268	3.23	0.00	11884*	0.00	0.00	12268	3.23	0.00	11884*	0.00	0.00	11884*	0.00	0.00
5	12132	2.09	0.00	11884*	0.00	0.00	12268	3.23	0.00	11884*	0.00	0.00	11884*	0.00	0.00
6	29370*	0.00	0.00	29370*	0.00	0.00	29370*	0.00	0.00	29370*	0.00	0.00	29370*	0.00	0.00
7	29708	1.15	0.00	29380	0.03	0.00	29398	0.10	0.00	29370*	0.00	0.00	29370*	0.00	0.00
8	29489	0.54	0.74	29370	0.13	0.00	29421	0.31	0.54	29370	0.13	0.00	29370	0.13	0.00
9	29489	0.67	0.00	29370	0.26	0.00	29489	0.67	0.00	29370	0.26	0.00	29370	0.26	0.00
10	29708	1.52	0.00	29370	0.37	0.00	29557	1.00	0.01	29370	0.37	0.00	29370	0.37	0.00
11	66621	0.11	0.00	67227	1.02	0.00	66621	0.11	0.00	66621	0.11	0.00	66621	0.11	0.00
12	67024	0.72	0.00	66798	0.38	0.34	66827	0.42	0.29	66548*	0.00	0.00	66548*	0.00	0.00
13	67024	-0.07	0.00	67024	-0.07	0.00	66740	-0.50	0.00	66548	-0.78	0.00	66548	-0.78	0.00
14	67024	0.70	0.00	67024	0.70	0.00	66740	0.28	0.12	66548	-0.01	0.00	66548	-0.01	0.00
15	67024	0.73	0.00	66958	0.63	0.10	66753	0.32	0.02	66548	0.02	0.00	66548	0.02	0.00

TABLEAU 4.7 – Résultats pour la nomenclature 6x6-2 avec l’algorithme glouton

Algorithme ascendant

Les résultats associés à l’algorithme ascendant sont présentés dans le Tableau 4.8. Cette méthode offre la même performance en qualité de solution que l’algorithme glouton pour SP4 et SP5, mais améliore le temps de calcul. De plus, les solutions avec SP1, SP2 et SP3 sont améliorées, tout comme les temps de calcul.

En ce qui concerne le problème intégré, les écarts moyens avec IBM ILOG CPLEX diminuent, SP4 et SP5 étant à nouveau les stratégies les plus performantes, avec un écart moyen de 0.01%, et permettant d’obtenir 8 solutions optimales. Comme avec l’algorithme glouton, les solutions correspondant aux instances 13 et 14 sont meilleures que celles du solveur.

Problème à séquence fixée															
Instance	SP1			SP2			SP3			SP4			SP5		
	UB	G	t(s)	UB	G	t(s)	UB	G	t(s)	UB	G	t(s)	UB	G	t(s)
1	12020	1.14	0.84	11884*	0.00	7.24	12268	3.23	0.78	11884*	0.00	7.79	11884*	0.00	0.69
2	12223	2.85	1.19	11884*	0.00	6.63	12268	3.23	0.80	11884*	0.00	7.06	11884*	0.00	0.98
3	11998	0.96	0.81	11998	0.96	6.55	11998	0.96	0.80	11884*	0.00	7.02	11884*	0.00	1.00
4	12268	3.23	1.21	11884*	0.00	6.63	12268	3.23	0.78	11884*	0.00	7.11	11884*	0.00	1.01
5	12132	2.09	1.60	11884*	0.00	6.69	12268	3.23	0.80	11884*	0.00	7.05	11884*	0.00	1.05
6	29370*	0.00	15.25	29370*	0.00	1.56	29370*	0.00	13.49	29370*	0.00	2.82	29370*	0.00	5.75
7	29708	1.15	7.62	29380	0.03	1.56	29398	0.10	7.52	29370*	0.00	1.60	29370*	0.00	6.96
8	29708	1.15	2.74	29370*	0.00	1.97	29581	0.72	2.26	29370*	0.00	1.31	29370*	0.00	5.01
9	29489	0.60	6.65	29370	0.20	1.50	29489	0.60	1.86	29370	0.20	1.44	29370	0.20	4.18
10	29708	1.48	6.40	29370	0.32	1.42	29561	0.98	4.60	29370	0.32	1.37	29370	0.32	3.24
11	66621	0.10	1.64	67699	1.72	1.69	66621	0.10	1.62	66621	0.10	0.78	66621	0.10	0.92
12	67024	0.72	7.27	66732	0.28	4.38	66786	0.36	19.72	66548*	0.00	7.07	66548*	0.00	13.19
13	67024	0.73	4.41	66685	0.22	5.41	66754	0.33	7.36	66548	0.02	7.28	66548	0.02	6.57
14	67024	0.80	4.10	66623	0.19	4.04	66738	0.37	6.71	66548	0.08	6.81	66548	0.08	11.78
15	67024	0.85	2.60	67024	0.85	1.53	66941	0.73	2.75	66548	0.14	2.66	66548	0.14	6.76

Problème intégré															
Instance	SP1			SP2			SP3			SP4			SP5		
	UB	G	A												
1	11884*	0.00	1.13	11884*	0.00	0.00	11884*	0.00	3.13	11884*	0.00	0.00	11884*	0.00	0.00
2	12223	2.85	0.00	11884*	0.00	0.00	12268	3.23	0.00	11884*	0.00	0.00	11884*	0.00	0.00
3	11998	0.96	0.00	11998	0.96	0.00	11998	0.96	0.00	11884*	0.00	0.00	11884*	0.00	0.00
4	12268	3.23	0.00	11884*	0.00	0.00	12268	3.23	0.00	11884*	0.00	0.00	11884*	0.00	0.00
5	12132	2.09	0.00	11884*	0.00	0.00	12268	3.23	0.00	11884*	0.00	0.00	11884*	0.00	0.00
6	29370*	0.00	0.00	29370*	0.00	0.00	29370*	0.00	0.00	29370*	0.00	0.00	29370*	0.00	0.00
7	29708	1.15	0.00	29380	0.03	0.00	29398	0.10	0.00	29370*	0.00	0.00	29370*	0.00	0.00
8	29489	0.54	0.74	29370	0.13	0.00	29416	0.29	0.56	29370	0.13	0.00	29370	0.13	0.00
9	29489	0.67	0.00	29370	0.26	0.00	29489	0.67	0.00	29370	0.26	0.00	29370	0.26	0.00
10	29708	1.52	0.00	29370	0.37	0.00	29525	0.90	0.12	29370	0.37	0.00	29370	0.37	0.00
11	66621	0.11	0.00	67227	1.02	0.70	66621	0.11	0.00	66621	0.11	0.00	66621	0.11	0.00
12	67024	0.72	0.00	66685	0.21	0.07	66716	0.25	0.10	66548*	0.00	0.00	66548	0.00	0.00
13	67024	-0.07	0.00	66609	-0.69	0.11	66754	-0.48	0.00	66548	-0.78	0.00	66548	-0.78	0.00
14	67024	0.70	0.00	66563	0.01	0.09	66680	0.19	0.09	66548	-0.01	0.00	66548	-0.01	0.00
15	67024	0.73	0.00	66685	0.22	0.51	66750	0.32	0.29	66548	0.02	0.00	66548	0.02	0.00

TABLEAU 4.8 – Résultats pour la nomenclature 6x6-2 avec l’algorithme ascendant

4.4.1.3 Nomenclature 6x6-3

Pour ce qui est de la nomenclature 6x6-3 (Figure 4.13), nous avons 2 niveaux et 6 produits, avec 3 produits par niveau. Chaque produit du niveau inférieur est composant de tous les produits du niveau supérieur. Les solutions obtenues par le solveur commercial sont présentées dans le Tableau 4.9. La solution optimale est trouvée dans tous les cas, sauf pour les instances 11 et 12 associées au problème intégré.

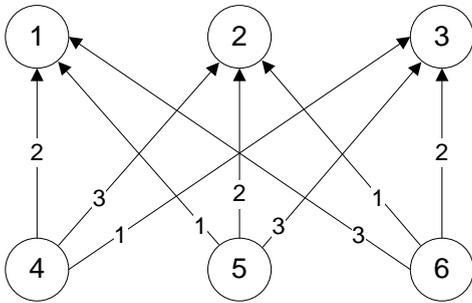


FIGURE 4.13 – Nomenclature 6x6-3

Instance	cap	T	ALB	CPL1	CPL2
1	0.60	5	6311	6437*	6335*
2	0.65			6385*	6335*
3	0.70			6351*	6335*
4	0.75			6335*	6335*
5	0.80			6335*	6335*
6	0.60	10	13510	13891*	13685*
7	0.65			13800*	13585*
8	0.70			13731*	13548*
9	0.85			13665*	13546*
10	0.80			13615*	13546*
11	0.60	20	28301	28979*	28722
12	0.65			28760*	28465
13	0.70			28582*	28373*
14	0.75			28544*	28365*
15	0.80			28509*	28365*

TABLEAU 4.9 – Solutions obtenues avec IBM ILOG CPLEX pour la nomenclature 6x6-3

Application de l'algorithme glouton

Les résultats des expérimentations avec l'algorithme glouton sont présentés dans le Tableau 4.10. Notre approche propose de bonnes solutions pour toutes les instances, mais les écarts avec les solutions optimales sont un peu plus élevés que pour les nomenclatures précédentes. En qualité de solution, ce sont les stratégies validant en premier les contraintes de nomenclature qui offrent une meilleure performance, avec $\bar{G} = 1.15\%$ pour SP2 et $\bar{G} = 1.12\%$ pour SP4. Cependant, le temps de calcul est en moyenne 65% plus petit avec SP1, qui présente un écart moyen sur la solution optimale de 1.45%. La stratégie de lissage SP5 est celle qui consomme le plus de temps de calcul (13.35 secondes par instance en moyenne), et ses solutions sont globalement meilleures que celles de SP1 et SP3.

Le fait de commencer par satisfaire les contraintes de nomenclature prime sur le fait d'autoriser ou d'interdire la violation des contraintes de capacité. C'est pourquoi il n'y a pas une différence significative entre SP2 et SP4. En revanche, si l'on commence par valider les contraintes de capacité, l'autorisation ou l'interdiction de violer les contraintes de nomenclature devient important. Il est en fait préférable d'interdire la violation de ces contraintes, afin de faciliter leur validation postérieure. C'est pour cela que SP1 est plus performante que SP3, aussi bien en qualité de solution ($\Delta\bar{G} = 7.64\%$) qu'en temps de calcul ($\Delta\bar{t} = 51.29\%$).

Concernant la résolution du problème intégré, les plus grandes améliorations (1.08% en moyenne) sont obtenues avec SP1, grâce au faible temps de calcul passé sur chaque séquence,

Problème à séquence fixée															
Instance	SP1			SP2			SP3			SP4			SP5		
	UB	G	t(s)												
1	6523	1.34	0.95	6481	0.68	12.22	6491	0.84	0.71	6481	0.68	11.94	6489	0.81	1.17
2	6462	1.21	0.60	6434	0.77	10.33	6464	1.24	0.60	6434	0.77	10.11	6443	0.91	0.70
3	6355	0.06	0.58	6354	0.05	11.09	6464	1.78	0.58	6354	0.05	10.82	6440	1.40	0.62
4	6450	1.82	0.50	6424	1.40	11.33	6464	2.04	0.50	6424	1.40	11.06	6424	1.40	0.47
5	6424	1.40	0.59	6424	1.40	9.43	6424	1.40	0.57	6424	1.40	9.23	6424	1.40	0.53
6	14083	1.38	8.28	14065	1.25	49.18	14095	1.47	1.85	14065	1.25	44.67	14101	1.51	2.96
7	14005	1.49	2.93	14011	1.53	14.74	14017	1.57	1.03	14011	1.53	12.49	13963	1.18	1.89
8	13975	1.78	0.94	13976	1.78	7.12	13998	1.94	0.57	13976	1.78	6.64	13962	1.68	1.26
9	13877	1.55	0.38	13841	1.29	5.90	13841	1.29	1.49	13841	1.29	5.31	13818	1.12	2.00
10	13850	1.73	0.34	13840	1.65	19.94	13841	1.66	0.43	13840	1.65	19.06	13840	1.65	0.53
11	30144	4.02	18.84	29438	1.58	20.03	29563	2.02	69.72	29303	1.12	30.38	29489	1.76	104.13
12	29181	1.46	19.68	29175	1.44	15.49	29307	1.90	27.20	29175	1.44	18.03	29209	1.56	43.12
13	28813	0.81	7.24	28878	1.04	5.14	29113	1.86	22.06	28878	1.04	6.64	29064	1.69	26.24
14	28826	0.99	3.05	28729	0.65	1.91	28977	1.52	9.00	28729	0.65	2.34	28851	1.08	27.05
15	28700	0.67	5.74	28699	0.67	4.25	28814	1.07	8.75	28699	0.67	5.21	28814	1.07	17.57

Problème intégré															
Instance	SP1			SP2			SP3			SP4			SP5		
	UB	G	A												
1	6345	0.16	2.73	6393	0.92	1.36	6463	2.02	0.43	6393	0.92	1.36	6460	1.97	0.45
2	6388	0.84	1.15	6359	0.38	1.17	6424	1.40	0.62	6359	0.38	1.17	6443	1.70	0.00
3	6355	0.32	0.00	6354	0.30	0.00	6424	1.40	0.62	6354	0.30	0.00	6424	1.40	0.25
4	6355	0.32	1.47	6354	0.30	1.09	6424	1.40	0.62	6354	0.30	1.09	6424	1.40	0.00
5	6424	1.40	0.00	6424	1.40	0.00	6424	1.40	0.00	6424	1.40	0.00	6424	1.40	0.00
6	13985	2.19	0.70	13890	1.50	1.24	13948	1.92	1.04	14065	2.78	0.00	14101	3.04	0.00
7	13766	1.33	1.71	13789	1.50	1.58	13749	1.21	1.91	13805	1.62	1.47	13805	1.62	1.13
8	13662	0.84	2.24	13675	0.94	2.15	13675	0.94	2.31	13689	1.04	2.05	13651	0.76	2.23
9	13639	0.69	1.72	13639	0.69	1.46	13639	0.69	1.46	13639	0.69	1.46	13639	0.69	1.30
10	13639	0.69	1.52	13639	0.69	1.45	13639	0.69	1.46	13639	0.69	1.45	13639	0.69	1.45
11	29474	2.62	2.22	29265	1.89	0.59	29563	2.93	0.00	29303	2.02	0.00	29489	2.67	0.00
12	29172	2.48	0.03	29167	2.47	0.03	29306	2.95	0.00	29060	2.09	0.39	29209	2.61	0.00
13	28784	1.45	0.10	28777	1.42	0.35	28935	1.98	0.61	28777	1.42	0.35	29064	2.44	0.00
14	28684	1.12	0.49	28702	1.19	0.09	28834	1.65	0.49	28659	1.04	0.24	28851	1.71	0.00
15	28679	1.11	0.07	28596	0.81	0.36	28814	1.58	0.00	28596	0.81	0.36	28642	0.98	0.60

TABLEAU 4.10 – Résultats pour la nomenclature 6x6-3 avec l’algorithme glouton

et SP2 devient la stratégie la plus performante avec $\bar{G} = 1.09\%$. Les améliorations moins significatives sont obtenues avec SP5, à cause d’un temps de calcul élevé pour résoudre le problème avec séquence fixée.

Application de l’algorithme ascendant

Les résultats obtenus avec l’algorithme ascendant sont présentés dans le Tableau 4.11. La méthode offre une très bonne performance par rapport aux deux autres méthodes. En terme de qualité de solution, elle est un peu moins compétitive que l’algorithme glouton, les écarts moyens étant légèrement détériorés (entre 1.91% et 8.93% d’augmentation par rapport aux écarts de l’algorithme glouton). En temps de calcul, l’algorithme ascendant est significativement plus

rapide avec toutes les stratégies de lissage (entre 30.62% et 88.19% de réduction), excepté avec SP1, où le temps moyen augmente de 25.90%.

Problème à séquence fixée															
Instance	SP1			SP2			SP3			SP4			SP5		
	UB	G	t(s)	UB	G	t(s)	UB	G	t(s)	UB	G	t(s)	UB	G	t(s)
1	6523	1.34	1.24	6489	0.81	0.45	6491	0.84	0.70	6489	0.81	0.41	6489	0.81	0.99
2	6462	1.21	0.72	6462	1.21	0.36	6464	1.24	0.66	6462	1.21	0.36	6443	0.91	0.66
3	6401	0.79	0.67	6400	0.77	0.31	6464	1.78	0.67	6400	0.77	0.32	6440	1.40	0.61
4	6450	1.82	0.65	6424	1.40	0.27	6464	2.04	0.61	6424	1.40	0.31	6424	1.40	0.49
5	6424	1.40	0.79	6424	1.40	0.25	6424	1.40	0.75	6424	1.40	0.28	6424	1.40	0.55
6	14083	1.38	11.79	14040	1.07	5.79	14095	1.47	1.70	14040	1.07	4.84	14101	1.51	3.53
7	14005	1.49	1.27	13967	1.21	1.23	14017	1.57	1.06	13967	1.21	1.15	13963	1.18	1.97
8	13975	1.78	1.08	13976	1.78	1.26	13998	1.94	0.73	13976	1.78	1.18	13962	1.68	1.13
9	13877	1.55	0.68	13841	1.29	1.05	13841	1.29	1.23	13841	1.29	1.03	13818	1.12	1.66
10	13850	1.73	0.62	13840	1.65	0.97	13841	1.66	0.58	13840	1.65	0.97	13840	1.65	0.48
11	30144	4.02	26.42	29445	1.61	4.66	29489	1.76	38.56	29423	1.53	5.51	29489	1.76	96.30
12	29181	1.46	21.26	29175	1.44	3.38	29307	1.90	14.18	29175	1.44	5.71	29205	1.55	26.33
13	28815	0.82	12.65	28852	0.94	1.59	29184	2.11	11.12	28852	0.94	2.37	29139	1.95	13.57
14	28778	0.82	4.04	28769	0.79	0.91	29025	1.69	7.11	28769	0.79	1.40	28946	1.41	5.20
15	28720	0.74	5.13	28774	0.93	0.97	28903	1.38	3.45	28774	0.93	1.47	28889	1.33	6.16

Problème intégré															
Instance	SP1			SP2			SP3			SP4			SP5		
	UB	G	A												
1	6391	0.88	2.02	6393	0.92	1.48	6463	2.02	0.43	6450	1.82	0.60	6460	1.97	0.45
2	6424	1.40	0.59	6440	1.66	0.34	6424	1.40	0.62	6404	1.09	0.90	6424	1.40	0.29
3	6401	1.04	0.00	6400	1.03	0.00	6424	1.40	0.62	6400	1.03	0.00	6424	1.40	0.25
4	6424	1.40	0.40	6424	1.40	0.00	6424	1.40	0.62	6381	0.73	0.67	6424	1.40	0.00
5	6424	1.40	0.00	6424	1.40	0.00	6424	1.40	0.00	6381	0.73	0.67	6424	1.40	0.00
6	14083	2.91	0.00	14040	2.78	0.00	14095	3.00	0.00	13984	2.18	0.40	14101	3.04	0.00
7	13855	1.99	1.07	13789	1.50	1.27	14003	3.08	0.10	13961	2.77	0.04	13786	1.48	1.27
8	13841	2.16	0.96	13675	0.94	2.15	13824	2.04	1.24	13946	2.94	0.21	13683	1.00	2.00
9	13825	2.06	0.37	13639	0.69	1.46	13793	1.82	0.35	13841	2.18	0.00	13679	0.98	1.01
10	13775	1.69	0.54	13639	0.69	1.45	13678	0.97	1.18	13770	1.65	0.51	13639	0.69	1.45
11	29459	2.57	2.27	29442	2.51	0.01	29489	2.67	0.00	29367	2.25	0.19	29487	2.66	0.01
12	29127	2.33	0.19	29035	2.00	0.48	29252	2.76	0.19	29118	2.29	0.20	29205	2.60	0.00
13	28766	1.39	0.17	28761	1.37	0.32	29033	2.33	0.52	28852	1.93	0.00	29064	2.44	0.26
14	28732	1.29	0.16	28729	1.28	0.14	28987	2.19	0.13	28769	1.93	0.00	28900	1.89	0.16
15	28706	1.20	0.05	28630	0.93	0.50	28711	1.22	0.66	28774	1.46	0.00	28671	1.08	0.75

TABLEAU 4.11 – Résultats pour la nomenclature 6x6-3 avec l’algorithme ascendant

Il n’y a pas de différence significative lorsque l’on autorise ou interdit la violation des contraintes de capacité pour satisfaire celles de nomenclature, ni sur la qualité de solution ni sur le temps de calcul. SP2 et SP4 proposent toutes les deux un écart moyen de 1.22% et des temps moyens de calcul de 1.56 secondes et 1.82 secondes respectivement. En revanche, lorsque l’on valide les contraintes de nomenclature, il est préférable d’interdire la violation des contraintes de nomenclature, SP1 présentant un écart moyen de 1.49% et celui de SP3 étant de 1.60%. SP5 est la stratégie qui consomme le plus de temps avec $\bar{t} = 10.64$ secondes.

Pour ce qui est du problème intégré, la stratégie SP2 est la plus performante et celle qui génère les améliorations les plus significatives, avec $\bar{G} = 1.41\%$ et $\bar{A} = 0.64\%$. L’avantage par

rapport à SP4 est dû à une résolution plus rapide du problème à séquence fixée, permettant d'explorer plus de séquences.

4.4.1.4 Nomenclature 6x6-4

Nous nous intéressons maintenant à un cas d'étude un peu différent. C'est la nomenclature 6x6-4 (Figure 4.14), qui comporte deux produits finis, chacun avec uniquement deux prédécesseurs différents, sans liens entre eux. La nomenclature peut donc être divisée en deux sous-nomenclatures. Comme pour les deux cas d'études précédents, le solveur commercial détermine les solutions optimales pour toutes les instances, excepté celles du problème intégré avec 20 périodes, comme détaillé dans le Tableau 4.12.

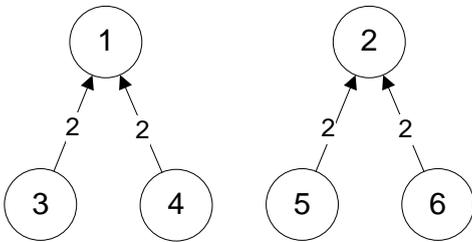


FIGURE 4.14 – Nomenclature 6x6-4

Instance	cap	T	ALB	CPL1	CPL2
1	0.60	5	3349	3565*	3523*
2	0.65			3544*	3523*
3	0.70			3527*	3523*
4	0.75			3523*	3523*
5	0.80			3523*	3523*
6	0.60	10	6497	7497*	7437*
7	0.65			7455*	7427*
8	0.70			7446*	7407*
9	0.85			7401*	7357*
10	0.80			7357*	7357*
11	0.60	20	12867	16108*	16139
12	0.65			16064*	16133
13	0.70			16058*	16107
14	0.75			16058*	16096
15	0.80			16042*	16122

TABLEAU 4.12 – Solutions obtenues avec IBM ILOG CPLEX pour la nomenclature 6x6-4

Application de l'algorithme glouton

Les solutions obtenues avec l'algorithme glouton sont affichées dans le Tableau 4.13. Toutes les stratégies offrent une performance similaire, avec un léger avantage pour SP4, qui présente un écart moyen sur la solution optimale de 1.21% et un temps de calcul moyen de 3.74 secondes. La stratégie la moins compétitive est SP3, avec $\bar{G} = 1.63\%$ et $\bar{t} = 4.89$ secondes.

La stratégie SP2 devient la plus performante lorsque l'on résout le problème intégré, avec un écart moyen de 0.93%. Cependant, SP4 offre aussi une bonne performance, avec $\bar{G} = 0.97\%$. Les plus grandes améliorations de la borne supérieure sont obtenues avec SP3, avec un écart

Problème à séquence fixée															
Instance	SP1			SP2			SP3			SP4			SP5		
	UB	G	t(s)	UB	G	t(s)	UB	G	t(s)	UB	G	t(s)	UB	G	t(s)
1	3586	0.59	0.81	3607	1.18	6.16	3639	2.08	0.52	3607	1.18	6.02	3586	0.59	0.67
2	3561	0.48	0.59	3561	0.48	3.85	3586	1.19	0.66	3561	0.48	3.82	3584	1.13	0.67
3	3551	0.68	0.53	3551	0.68	3.00	3551	0.68	0.58	3551	0.68	2.96	3551	0.68	0.56
4	3551	0.79	0.58	3551	0.79	2.62	3551	0.79	0.64	3551	0.79	2.59	3551	0.79	1.00
5	3551	0.79	0.63	3551	0.79	2.75	3551	0.79	0.69	3551	0.79	2.71	3551	0.79	0.78
6	7635	2.09	0.64	7603	1.66	1.51	7727	3.32	1.90	7603	1.66	1.37	7603	1.66	1.79
7	7656	2.70	0.76	7589	1.80	1.47	7609	2.07	1.64	7589	1.80	1.35	7592	1.84	1.19
8	7588	1.91	1.36	7580	1.80	1.61	7611	2.22	1.10	7580	1.80	1.44	7587	1.89	1.26
9	7506	1.42	0.62	7513	1.51	1.53	7559	2.13	0.86	7513	1.51	1.41	7544	1.93	1.00
10	7463	1.44	0.45	7463	1.44	1.33	7463	1.44	0.55	7463	1.44	1.25	7463	1.44	0.67
11	16417	1.92	11.94	16344	1.47	8.06	16392	1.76	20.19	16354	1.53	7.37	16331	1.38	17.81
12	16252	1.17	10.92	16300	1.47	7.38	16333	1.67	13.20	16224	1.00	6.01	16224	1.00	15.23
13	16243	1.15	8.90	16243	1.15	6.60	16313	1.59	9.94	16293	1.46	5.67	16293	1.46	11.06
14	16239	1.13	9.08	16239	1.13	7.12	16287	1.43	11.75	16233	1.09	5.38	16233	1.09	11.17
15	16186	0.90	8.77	16261	1.37	6.70	16239	1.23	9.08	16191	0.93	6.82	16185	0.89	9.19

Problème intégré															
Instance	SP1			SP2			SP3			SP4			SP5		
	UB	G	A	UB	G	A	UB	G	A	UB	G	A	UB	G	A
1	3551	0.79	0.98	3551	0.79	1.55	3551	0.79	2.42	3551	0.79	1.55	3551	0.79	0.98
2	3551	0.79	0.28	3551	0.79	0.28	3551	0.79	0.98	3551	0.79	0.28	3551	0.79	0.92
3	3551	0.79	0.00	3551	0.79	0.00	3551	0.79	0.00	3551	0.79	0.00	3551	0.79	0.00
4	3551	0.79	0.00	3538	0.43	0.37	3551	0.79	0.00	3538	0.43	0.37	3551	0.79	0.00
5	3551	0.79	0.00	3538	0.43	0.37	3551	0.79	0.00	3538	0.43	0.37	3551	0.79	0.00
6	7598	2.16	0.48	7581	1.94	0.29	7610	2.33	1.51	7581	1.94	0.29	7584	1.98	0.25
7	7596	2.28	0.78	7544	1.58	0.59	7559	1.78	0.66	7544	1.58	0.59	7559	1.78	0.43
8	7544	1.85	0.58	7513	1.43	0.88	7588	2.44	0.30	7513	1.43	0.88	7559	2.05	0.37
9	7463	1.44	0.57	7463	1.44	0.67	7463	1.44	1.27	7463	1.44	0.67	7463	1.44	1.07
10	7463	1.44	0.00	7463	1.44	0.00	7463	1.44	0.00	7463	1.44	0.00	7463	1.44	0.00
11	16286	0.91	0.80	16252	0.70	0.56	16294	0.96	0.60	16280	0.87	0.45	16322	1.13	0.06
12	16233	0.62	0.12	16224	0.56	0.47	16233	0.62	0.61	16224	0.56	0.00	16224	0.56	0.00
13	16233	0.78	0.06	16233	0.78	0.06	16213	0.66	0.61	16233	0.78	0.37	16279	1.07	0.09
14	16186	0.56	0.33	16233	0.85	0.04	16233	0.85	0.33	16233	0.85	0.00	16233	0.85	0.00
15	16116	-0.04	0.43	16116	-0.04	0.89	16116	-0.04	0.76	16185	0.39	0.04	16185	0.39	0.00

TABLEAU 4.13 – Résultats pour la nomenclature 6x6-4 avec l’algorithme glouton

moyen de 1.10%. On notera aussi que la dernière instance est mieux résolue avec SP1, SP2 et SP3 qu’avec le solveur commercial.

Application de l’algorithme ascendant

Enfin, les expérimentations avec l’algorithme ascendant sont présentées dans le Tableau 4.14. Cette fois-ci la différence avec l’algorithme glouton est un peu plus significative. La qualité de la solution est détériorée avec des écarts moyens par rapport à l’optimum variant entre 2.61% et 2.73%, ce qui reste raisonnable, mais représente une augmentation entre 64.42% et 125.62% par rapport aux écarts moyens de l’algorithme glouton. En ce qui concerne le temps de calcul, une réduction importante est obtenue avec SP2, SP3 et SP4 (66.91%, 27.40% et

50.27% respectivement), et une augmentation est observée avec SP1 et SP5 (18.57% et 10.12% respectivement). La meilleure borne supérieure est obtenue en moyenne avec SP5, mais elle présente le temps de calcul moyen le plus élevé, à cause des instances avec 20 périodes. Le meilleur rapport entre qualité de solution et temps de calcul correspond à SP2.

Problème à séquence fixée															
Instance	SP1			SP2			SP3			SP4			SP5		
	UB	G	t(s)												
1	3586	0.59	1.69	3586	0.59	0.37	3633	1.91	1.01	3586	0.59	0.35	3586	0.59	0.69
2	3586	1.19	1.46	3628	2.37	0.36	3586	1.19	1.64	3628	2.37	0.39	3628	2.37	0.68
3	3586	1.67	1.11	3617	2.55	0.37	3586	1.67	1.06	3617	2.55	0.39	3586	1.67	0.74
4	3616	2.64	3.86	3568	1.28	0.37	3568	1.28	3.74	3568	1.28	0.41	3568	1.28	0.69
5	3568	1.28	3.26	3568	1.28	0.45	3568	1.28	3.15	3568	1.28	0.49	3568	1.28	0.94
6	7711	3.10	1.57	7717	3.18	1.22	7770	3.89	2.09	7717	3.18	1.41	7717	3.18	1.86
7	7620	2.21	4.74	7733	3.73	1.08	7711	3.43	1.06	7732	3.72	1.21	7725	3.62	2.93
8	7705	3.48	1.21	7644	2.66	1.05	7687	3.24	0.94	7644	2.66	1.16	7680	3.14	1.87
9	7684	3.82	1.21	7666	3.58	1.04	7669	3.62	0.98	7666	3.58	1.21	7663	3.54	1.83
10	7657	4.08	0.82	7651	4.00	0.98	7657	4.08	0.67	7651	4.00	1.13	7654	4.04	1.27
11	16713	3.76	9.13	16598	3.04	2.75	16671	3.50	8.70	16608	3.10	4.06	16582	2.94	16.87
12	16566	3.13	9.89	16581	3.22	2.70	16531	2.91	8.21	16585	3.24	3.69	16550	3.03	14.20
13	16523	2.90	9.57	16539	3.00	2.70	16469	2.56	6.60	16610	3.44	3.91	16529	2.93	13.13
14	16469	2.56	8.84	16469	2.56	2.68	16515	2.85	7.24	16539	3.00	4.36	16514	2.84	11.91
15	16527	3.02	8.76	16469	2.66	2.26	16485	2.76	6.10	16514	2.94	3.76	16479	2.72	11.99

Problème intégré															
Instance	SP1			SP2			SP3			SP4			SP5		
	UB	G	A												
1	3586	1.79	0.00	3586	1.79	0.00	3586	1.79	1.29	3586	2.27	0.00	3586	1.79	0.00
2	3586	1.79	0.00	3628	2.98	0.00	3586	1.79	0.00	3573	1.42	1.52	3586	1.79	1.16
3	3568	1.28	0.50	3586	1.79	0.86	3568	1.28	0.50	3563	1.14	1.49	3568	1.28	0.50
4	3568	1.28	1.33	3568	1.28	0.00	3568	1.28	0.00	3523	0.00	1.26	3568	1.28	0.00
5	3568	1.28	0.00	3568	1.28	0.00	3568	1.28	0.00	3523	0.00	1.26	3568	1.28	0.00
6	7711	3.68	0.00	7634	2.65	1.08	7721	3.82	0.63	7686	3.35	0.40	7696	3.48	0.27
7	7620	2.60	0.00	7659	3.12	0.96	7620	2.60	1.18	7685	3.47	0.61	7659	3.12	0.85
8	7674	3.60	0.40	7620	2.88	0.31	7588	2.44	1.29	7644	4.10	0.00	7588	2.44	1.20
9	7684	4.44	0.00	7588	3.14	1.02	7614	3.49	0.72	7666	4.54	0.00	7588	3.14	0.98
10	7569	2.88	1.15	7543	2.53	1.41	7565	2.83	1.20	7651	4.54	0.00	7543	2.53	1.45
11	16622	2.99	0.54	16504	2.26	0.57	16512	2.31	0.95	16608	3.37	0.00	16540	2.48	0.25
12	16532	2.47	0.21	16483	2.17	0.59	16530	2.46	0.01	16585	3.38	0.00	16521	2.41	0.18
13	16469	2.25	0.33	16457	2.17	0.50	16469	2.25	0.00	16610	4.10	0.00	16527	2.61	0.01
14	16469	2.32	0.00	16469	2.32	0.00	16469	2.32	0.28	16539	3.46	0.00	16514	2.60	0.00
15	16467	2.14	0.36	16469	2.15	0.00	16436	1.95	0.30	16514	3.25	0.00	16458	2.08	0.13

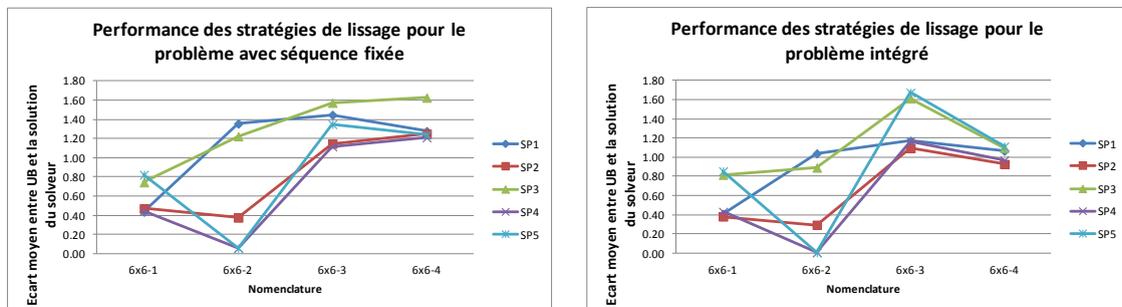
TABLEAU 4.14 – Résultats pour la nomenclature 6x6-4 avec l'algorithme ascendant

En ce qui concerne le problème intégré, plusieurs améliorations sont réalisées avec toutes les stratégies. La plus grande amélioration moyenne est obtenue avec SP2, qui surpasse SP5 comme méthode la plus performante. Constatons aussi que les instances 4 et 5 sont résolues de façon optimale avec SP4.

4.4.1.5 Bilan des expérimentations avec des job-shops 6x6

En tenant compte des 4 nomenclatures étudiées, des 5 stratégies de lissage et des 3 algorithmes de satisfaction des contraintes de nomenclature, nous pouvons décrire le comportement global de l'approche somme suit. Premièrement, considérons l'algorithme glouton, pour lequel une synthèse des résultats est présentée dans la Figure 4.15. Nous constatons que :

- La nomenclature 6x6-1 est relativement facile à résoudre avec toutes les stratégies de lissage,
- Les nomenclatures 6x6-3 et 6x6-4 sont les plus difficiles à résoudre, indépendamment de la stratégie de lissage,
- La difficulté de résolution du problème associé à la nomenclature 6x6-2 varie significativement selon la stratégie de lissage utilisée, SP4 et SP5 étant les stratégies les plus adéquates,
- Il est plus avantageux de satisfaire les contraintes de nomenclature avant celles de capacité. En effet, SP2 et SP4 offrent globalement la meilleure performance, les stratégies SP1 et SP3 n'étant pas compétitives,
- Il n'y a pas de différence significative entre le fait d'interdire ou d'autoriser la violation des contraintes de capacité, lorsque l'on cherche à satisfaire les contraintes de nomenclature. Hormis le cas de la nomenclature 6x6-2, pour laquelle SP4 est significativement meilleure, SP2 et SP4 offrent toujours une performance similaire,
- Si l'on satisfait les contraintes de capacité avant celles de nomenclature, il est préférable d'interdire la violation des contraintes de nomenclature. En effet, excepté le cas de la nomenclature 6x6-2, SP1 est plus performante que SP3.



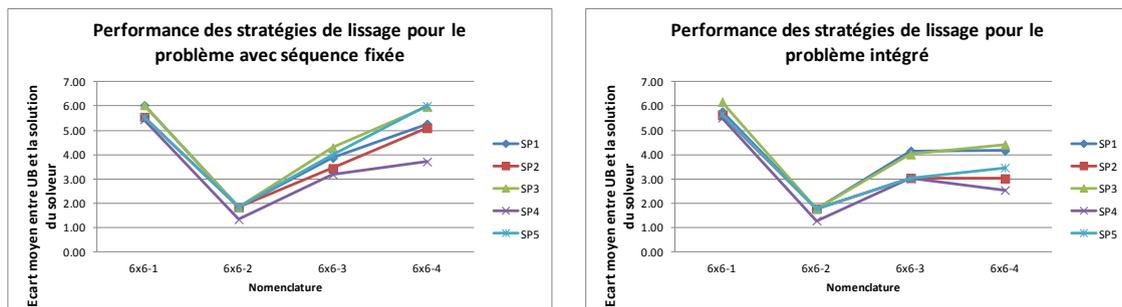
(a) Résultats pour le problème à séquence fixée

(b) Résultats pour le problème intégré

FIGURE 4.15 – Synthèse des résultats pour les nomenclatures 6x6 avec l'algorithme glouton

Considérons maintenant l'algorithme descendant, pour lequel une synthèse des résultats est présentée dans la Figure 4.16. Nous observons que :

- Les nomenclatures 6x6-1 et 6x6-4 sont les plus difficiles à résoudre. Néanmoins, des améliorations significatives des solutions associées à la nomenclature 6x6-4 sont réalisées en résolvant le problème intégré,
- La nomenclature 6x6-2 est la plus facile à résoudre,
- Il est plus avantageux de satisfaire les contraintes de nomenclature avant celles de capacité, SP2 et SP4 étant les stratégies de lissage les plus performantes,
- De meilleurs résultats sont obtenus lorsque l'on autorise la violation des contraintes de capacité pendant la validation des contraintes de nomenclature, SP4 étant plus performante que SP2,
- Il n'y a pas de différence significative entre le fait d'interdire ou d'autoriser la violation des contraintes de nomenclature pendant la validation des contraintes de capacité. SP1 et SP3 proposent des résultats similaires.



(a) Résultats pour le problème à séquence fixée

(b) Résultats pour le problème intégré

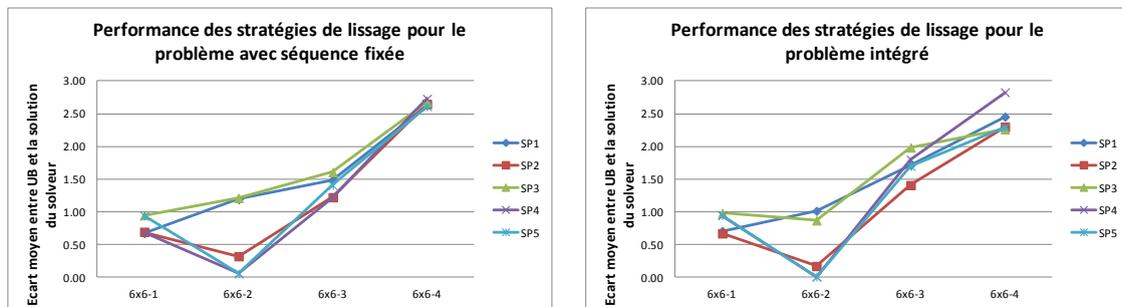
FIGURE 4.16 – Synthèse des résultats pour les nomenclatures 6x6 avec l'algorithme descendant

En ce qui concerne l'application de l'algorithme ascendant, nous présentons une synthèse des résultats dans la Figure 4.17. Nous pouvons constater que :

- Les nomenclatures 6x6-3 et 6x6-4 sont les plus difficiles à résoudre, indépendamment de l'heuristique de lissage,
- Le problème associé à la nomenclature 6x6-2 est facile à résoudre avec les stratégies satisfaisant en premier les contraintes de nomenclature (SP2 et SP4), mais relativement difficile avec SP1 et SP3,
- Les stratégies qui commencent par satisfaire les contraintes de nomenclature offrent globalement une performance supérieure à celles des stratégies validant en premier les

contraintes de capacité. Cependant, SP1 et SP3 sont meilleures que SP4 pour le problème associé à la nomenclature 6x6-4.

- Hormis la résolution du problème à séquence fixée, pour lequel la stratégie SP4 est légèrement meilleure que SP2 (grâce à l'impact de la solution pour la nomenclature 6x6-2), il est préférable d'interdire la violation des contraintes de capacité lorsque l'on satisfait les contraintes de nomenclature. SP2 offre une performance globale meilleure que celle de SP4,
- Si les contraintes de capacité sont satisfaites avant celles de nomenclature, il est globalement préférable d'interdire la violation des contraintes de nomenclature, SP1 étant plus performante que SP3. Cependant, les écarts sont réduits en résolvant le problème intégré.



(a) Résultats pour le problème à séquence fixée

(b) Résultats pour le problème intégré

FIGURE 4.17 – Synthèse des résultats pour les nomenclatures 6x6 avec l'algorithme ascendant

Pour finir, comparons la performance des trois algorithmes proposés. Dans la Figure 4.18, nous présentons les écarts moyens entre les bornes supérieures et les solutions du solveur commercial pour l'ensemble des nomenclatures 6x6 et nous différencions chacune des stratégies de lissage. Ainsi, nous observons que :

- L'algorithme glouton offre la meilleure performance, mais l'algorithme ascendant est compétitif,
- L'algorithme descendant n'est pas approprié,
- SP2 et SP4 sont globalement les stratégies les plus performantes, indépendamment de l'algorithme de validation des contraintes de nomenclature utilisé.

4.4.2 Expérimentations avec des ateliers de type job-shop 10x10

Nous considérons maintenant trois nomenclatures associées à un atelier de type job-shop 10x10, qui est par définition un problème de plus grande taille et plus difficile à résoudre que

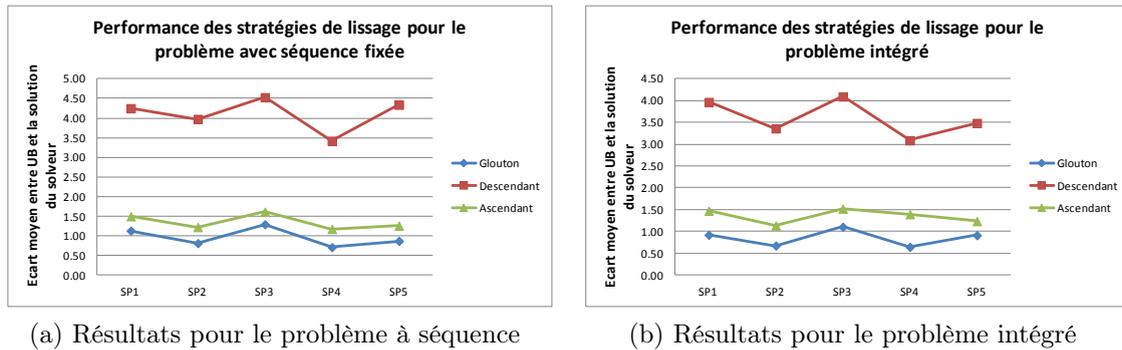


FIGURE 4.18 – Comparaison des algorithmes de validation des contraintes de nomenclature pour les nomenclatures 6x6

l'atelier de type job-shop 6x6. Nous nous focalisons sur l'analyse des expérimentations réalisées avec les algorithmes glouton et ascendant, l'algorithme descendant n'étant pas compétitif. Les résultats associés à l'algorithme descendant peuvent être consultés dans l'Annexe B.

Les paramètres généraux utilisés pour construire les instances sont détaillés dans le Tableau 4.15.

Nomenclature	c_i^s	d_{il}	L_i	c_i^p	c_i^{inv}
10x10-1	5	[0, 15]	1	4	1
10x10-2	100	[0, 15]	1	4	[1, 15]
10x10-3	100	[0, 15]	1	4	[1, 15]

TABLEAU 4.15 – Paramètres généraux associés aux ateliers de type job-shop 10x10

4.4.2.1 Nomenclature 10x10-1

Dans la nomenclature 10x10-1 (Figure 4.19), nous avons 4 niveaux et 10 produits, avec un seul produit fini et deux composants basiques. Cette fois-ci, le solveur commercial ne résout de façon optimale que 8 instances sur 12 du problème à séquence fixée, avec $T = 5$ et $T = 10$. Des solutions sous-optimales sont proposées pour les instances avec 20 périodes. Pour ce qui est du problème intégré, des solutions réalisables, dont 3 optimales, sont proposées pour les instances avec 5 périodes. Pour les autres instances, aucune solution réalisable n'est obtenue, mettant ainsi en évidence le niveau de difficulté plus élevé que pour le cas des nomenclatures à 6 produits. Les résultats sont présentés dans le Tableau 4.16.

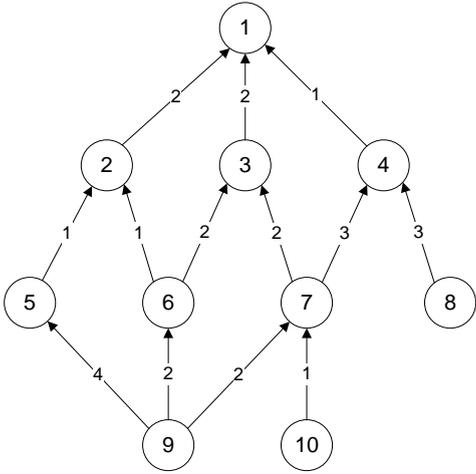


FIGURE 4.19 – Nomenclature 10x10-1

Instance	cap	T	ALB	CPL1	CPL2
1	0.90	5	11137	12910*	12910*
2	0.95			12910*	12910*
3	1.00			12910*	12910*
4	1.05			12910*	12928
5	0.85	10	19939	38497*	-
6	0.90			38492*	-
7	0.95			38476*	-
8	1.00			38456*	-
9	0.85	20	-23411	89188	-
10	0.90			89175	-
11	0.95			89101	-
12	1.00			89116	-

TABLEAU 4.16 – Solutions obtenues avec IBM ILOG CPLEX pour la nomenclature 10x10-1

Application de l’algorithme glouton

Les résultats obtenus par notre approche, grâce à l’implémentation de l’algorithme glouton, sont présentés dans le Tableau 4.17. Des solutions réalisables sont proposées pour toutes les instances, avec 4 solutions optimales (pour $T = 5$). Cependant, ces solutions correspondent au plan initial suivant la demande période par période, l’heuristique de lissage ne parvenant pas à obtenir de meilleures solutions avec aucune des stratégies. Ceci n’est pas réellement un problème pour ce cas d’étude précis, étant donné que les écarts entre les solutions obtenues par le solveur (optimales pour la plupart des cas) et les solutions initiales déterminées par l’approche ne sont pas très significatifs. L’écart est en moyenne égal à 0.18% avec toutes les stratégies. En ce qui concerne les temps de calcul, 4 stratégies sont très coûteuses (123.51 secondes, 53.57 secondes, 54.08 secondes et 221.75 secondes avec SP2, SP3, SP4 et SP5 respectivement). Seule SP1 présente un temps de calcul moyen raisonnable ($\bar{t} = 7.99$ secondes).

Aucune amélioration de la borne supérieure n’est obtenue en résolvant le problème intégré, mais la quatrième instance est mieux résolue par l’approche que par le solveur.

Application de l’algorithme ascendant

Les résultats avec l’algorithme ascendant sont présentés dans le Tableau 4.18. Contrairement aux deux autres méthodes, l’algorithme ascendant permet d’obtenir des solutions meilleures que le plan initial, principalement avec SP2, SP4 et SP5, ce qui fait améliorer légèrement la performance globale de l’approche par rapport aux algorithmes glouton et descendant. L’écart

Problème à séquence fixée															
Instance	SP1			SP2			SP3			SP4			SP5		
	UB	G	t(s)	UB	G	t(s)	UB	G	t(s)	UB	G	t(s)	UB	G	t(s)
1	12910*	0.00	2.77	12910*	0.00	2.09	12910*	0.00	2.77	12910*	0.00	2.05	12910*	0.00	2.01
2	12910*	0.00	1.50	12910*	0.00	1.51	12910*	0.00	1.50	12910*	0.00	1.44	12910*	0.00	1.47
3	12910*	0.00	1.18	12910*	0.00	2.44	12910*	0.00	1.10	12910*	0.00	2.62	12910*	0.00	1.11
4	12910*	0.00	1.10	12910*	0.00	1.07	12910*	0.00	1.09	12910*	0.00	1.35	12910*	0.00	1.10
5	38588	0.24	1.53	38588	0.24	3.43	38588	0.24	3.83	38588	0.24	2.24	38588	0.24	5.60
6	38588	0.25	2.17	38588	0.25	12.49	38588	0.25	15.00	38588	0.25	6.18	38588	0.25	14.66
7	38588	0.29	4.25	38588	0.29	6.91	38588	0.29	5.20	38588	0.29	4.12	38588	0.29	6.77
8	38588	0.34	47.12	38588	0.34	55.06	38588	0.34	22.41	38588	0.34	25.00	38588	0.34	74.35
9	89368	0.20	8.57	89368	0.20	286.55	89368	0.20	157.34	89368	0.20	152.00	89368	0.20	678.85
10	89368	0.22	8.55	89368	0.22	415.65	89368	0.22	160.52	89368	0.22	165.89	89368	0.22	647.87
11	89368	0.30	11.88	89368	0.30	402.18	89368	0.30	138.44	89368	0.30	163.08	89368	0.30	789.71
12	89368	0.28	5.25	89368	0.28	292.72	89368	0.28	133.58	89368	0.28	123.01	89368	0.28	437.44

Problème intégré															
Instance	SP1			SP2			SP3			SP4			SP5		
	UB	G	A												
1	12910*	0.00	0.00	12910*	0.00	0.00	12910*	0.00	0.00	12910*	0.00	0.00	12910*	0.00	0.00
2	12910*	0.00	0.00	12910*	0.00	0.00	12910*	0.00	0.00	12910*	0.00	0.00	12910*	0.00	0.00
3	12910*	0.00	0.00	12910*	0.00	0.00	12910*	0.00	0.00	12910*	0.00	0.00	12910*	0.00	0.00
4	12910	-0.14	0.00												
5	38588	-	0.00	38588	-	0.00	38588	-	0.00	38588	-	0.00	38588	-	0.00
6	38588	-	0.00	38588	-	0.00	38588	-	0.00	38588	-	0.00	38588	-	0.00
7	38588	-	0.00	38588	-	0.00	38588	-	0.00	38588	-	0.00	38588	-	0.00
8	38588	-	0.00	38588	-	0.00	38588	-	0.00	38588	-	0.00	38588	-	0.00
9	89368	-	0.00	89368	-	0.00	89368	-	0.00	89368	-	0.00	89368	-	0.00
10	89368	-	0.00	89368	-	0.00	89368	-	0.00	89368	-	0.00	89368	-	0.00
11	89368	-	0.00	89368	-	0.00	89368	-	0.00	89368	-	0.00	89368	-	0.00
12	89368	-	0.00	89368	-	0.00	89368	-	0.00	89368	-	0.00	89368	-	0.00

TABLEAU 4.17 – Résultats pour la nomenclature 10x10-1 avec l’algorithme glouton

moyen \bar{G} avec toutes les stratégies est de 0.17%. Cette amélioration est renforcée par une réduction du temps de calcul, par rapport à l’algorithme glouton, entre 41.16% et 77.88%. La stratégie la plus lente est à nouveau SP5, avec un temps de calcul moyen de 49.05 secondes, et la méthode la plus rapide est SP1, avec $\bar{t} = 3.95$ secondes.

Concernant le problème intégré, une légère amélioration est observée sur l’instance 6 avec la stratégie SP1, mais SP4 et SP5 présentent globalement la meilleure performance. Nous ne pouvons pas conclure sur la qualité globale de l’approche, car la plupart des instances ne sont pas résolues par le solveur. Cependant, notre approche garantit des solutions réalisables pour toutes les instances, contrairement à IBM ILOG CPLEX.

4.4.2.2 Nomenclature 10x10-2

Dans la nomenclature 10x10-2 (Figure 4.20), nous avons 3 niveaux et 10 produits, avec 3 produits sans successeurs et 3 produits sans prédécesseurs. Les résultats obtenus avec le solveur commercial sont présentés dans le Tableau 4.19. La solution optimale est trouvée pour les

Problème à séquence fixée															
Instance	SP1			SP2			SP3			SP4			SP5		
	UB	G	t(s)	UB	G	t(s)	UB	G	t(s)	UB	G	t(s)	UB	G	t(s)
1	12910*	0.00	2.03	12910*	0.00	2.59	12910*	0.00	3.76	12910*	0.00	2.57	12910*	0.00	1.97
2	12910*	0.00	1.43	12910*	0.00	1.87	12910*	0.00	3.75	12910*	0.00	1.88	12910*	0.00	1.42
3	12910*	0.00	0.99	12910*	0.00	2.65	12910*	0.00	1.00	12910*	0.00	2.74	12910*	0.00	1.02
4	12910*	0.00	0.99	12910*	0.00	1.30	12910*	0.00	0.99	12910*	0.00	2.63	12910*	0.00	1.00
5	38579	0.21	1.89	38579	0.21	2.81	38579	0.21	4.11	38579	0.21	2.52	38579	0.21	3.98
6	38588	0.25	1.71	38579	0.23	4.02	38579	0.23	6.83	38579	0.23	3.54	38579	0.23	6.44
7	38588	0.29	2.29	38579	0.27	2.28	38588	0.29	2.98	38579	0.27	2.19	38579	0.27	2.88
8	38588	0.34	7.88	38579	0.32	6.07	38588	0.34	5.97	38579	0.32	6.02	38579	0.32	15.23
9	89368	0.20	8.39	89368	0.20	143.58	89368	0.20	120.29	89362	0.20	66.45	89362	0.20	173.29
10	89368	0.22	8.49	89368	0.22	113.82	89368	0.22	83.24	89362	0.21	53.09	89362	0.21	138.97
11	89368	0.30	5.84	89362	0.29	77.91	89368	0.30	69.13	89362	0.29	49.53	89362	0.29	137.17
12	89368	0.28	5.52	89362	0.28	69.19	89368	0.28	76.21	89362	0.28	38.27	89362	0.28	105.25

Problème intégré															
Instance	SP1			SP2			SP3			SP4			SP5		
	UB	G	A												
1	12910*	0.00	0.00	12910*	0.00	0.00	12910*	0.00	0.00	12910*	0.00	0.00	12910*	0.00	0.00
2	12910*	0.00	0.00	12910*	0.00	0.00	12910*	0.00	0.00	12910*	0.00	0.00	12910*	0.00	0.00
3	12910*	0.00	0.00	12910*	0.00	0.00	12910*	0.00	0.00	12910*	0.00	0.00	12910*	0.00	0.00
4	12910	-0.14	0.00												
5	38579	-	0.00	38579	-	0.00	38579	-	0.00	38579	-	0.00	38579	-	0.00
6	38579	-	0.02	38579	-	0.00	38579	-	0.00	38579	-	0.00	38579	-	0.00
7	38588	-	0.00	38579	-	0.00	38588	-	0.00	38579	-	0.00	38579	-	0.00
8	38588	-	0.00	38579	-	0.00	38588	-	0.00	38579	-	0.00	38579	-	0.00
9	89368	-	0.00	89368	-	0.00	89368	-	0.00	89362	-	0.00	89362	-	0.00
10	89368	-	0.00	89368	-	0.00	89368	-	0.00	89362	-	0.00	89362	-	0.00
11	89368	-	0.00	89362	-	0.00	89368	-	0.00	89362	-	0.00	89362	-	0.00
12	89368	-	0.00	89362	-	0.00	89368	-	0.00	89362	-	0.00	89362	-	0.00

TABLEAU 4.18 – Résultats pour la nomenclature 10x10-1 avec l'algorithme ascendant

instances avec 5 et 10 périodes du problème avec séquence fixée, et des solutions réalisables sont proposées pour les instances avec $T = 20$. Le problème intégré est considérablement plus difficile à résoudre. Uniquement les instances avec 5 périodes sont résolues, dont 2 de façon optimale.

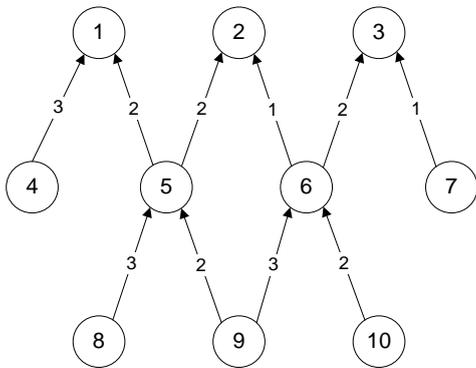


FIGURE 4.20 – Nomenclature 10x10-2

Instance	cap	T	ALB	CPL1	CPL2
1	0.60	5	11302	12555*	12558
2	0.65			12427*	12381*
3	0.70			12427*	12457
4	0.75			12381*	12381
5	0.80			12381*	12248*
6	0.60	10	23447	30572*	-
7	0.65			30506*	-
8	0.70			30546*	-
9	0.85			30329*	-
10	0.80			30258*	-
11	0.60	20	32953	66187	-
12	0.65			66022	-
13	0.70			65973	-
14	0.75			65692	-
15	0.80			65562	-

TABLEAU 4.19 – Solutions obtenues avec IBM ILOG CPLEX pour la nomenclature 10x10-2

Application de l’algorithme glouton

Les résultats avec l’algorithme glouton sont présentés dans le Tableau 4.20. Les écarts entre les solutions de notre approche et les solutions optimales sont plus importants que dans les cas d’études précédents, mettant en évidence la difficulté de ce type de nomenclature. L’algorithme glouton ne permet pas d’obtenir de solutions réalisables pour les instances avec $T = 10$ et $T = 20$, la solution proposée étant le plan initial. La qualité des solutions des différentes stratégies de lissage est différentiable à partir des instances avec 5 périodes. Les stratégies qui valident en premier les contraintes de nomenclature permettent une nouvelle fois d’obtenir globalement des meilleures solutions. SP5 offre le meilleur écart moyen \bar{G} , qui est de 4.52%, et SP2 et SP4 présentent un écart de 4.56%. D’autre part, SP1 et SP3 offrent des écarts moyens de 5.39% et 5.21% respectivement. En terme de temps de calcul, la meilleure stratégie est SP4 avec $\bar{t} = 6.21$ secondes, et la stratégie la plus lente est SP3 avec $\bar{t} = 11.83$ secondes. Si nous considérons un rapport entre qualité de solution et temps de calcul, c’est SP4 qu’il convient d’utiliser.

Concernant le problème intégré, la borne supérieure de l’instance 5 est améliorée avec SP3 et SP4, et SP5 reste la stratégie la plus performante avec un écart moyen de 3.61%, en considérant uniquement les instances avec $T = 5$, car le solveur commercial ne résout pas les autres instances.

Problème à séquence fixée															
Instance	SP1			SP2			SP3			SP4			SP5		
	UB	G	t(s)												
1	13476	7.34	2.75	13476	7.34	2.83	13476	7.34	3.00	13476	7.34	2.61	13476	7.34	2.95
2	12654	1.83	3.61	12688	2.10	3.99	12668	1.94	3.08	12688	2.10	3.63	12668	1.94	3.77
3	12784	2.87	3.19	12688	2.10	3.08	12784	2.87	3.09	12688	2.10	2.79	12638	1.70	2.81
4	13476	8.84	3.24	12638	2.08	3.16	13145	6.17	2.98	12638	2.08	2.75	12638	2.08	2.79
5	13476	8.84	2.89	12844	3.74	2.89	13476	8.84	2.84	12844	3.74	2.73	12845	3.75	2.79
6	32060	4.87	15.26	32060	4.87	12.64	32060	4.87	17.69	32060	4.87	8.98	32060	4.87	17.60
7	32060	5.09	2.26	32060	5.09	3.60	32060	5.09	3.54	32060	5.09	2.47	32060	5.09	2.68
8	32060	4.96	2.53	32060	4.96	3.66	32060	4.96	3.78	32060	4.96	2.58	32060	4.96	2.96
9	32060	5.71	7.93	32060	5.71	13.10	32060	5.71	12.67	32060	5.71	7.56	32060	5.71	14.26
10	32060	5.96	5.41	32060	5.96	6.00	32060	5.96	5.73	32060	5.96	3.97	32060	5.96	10.59
11	69112	4.42	12.10	69112	4.42	21.69	69112	4.42	36.34	69112	4.42	11.79	69112	4.42	19.51
12	69112	4.68	9.96	69112	4.68	8.81	69112	4.68	9.23	69112	4.68	5.43	69112	4.68	8.96
13	69112	4.76	14.15	69112	4.76	20.99	69112	4.76	24.49	69112	4.76	11.59	69112	4.76	22.76
14	69112	5.21	19.96	69112	5.21	19.58	69112	5.21	24.05	69112	5.21	11.60	69112	5.21	22.04
15	69112	5.41	19.56	69112	5.41	21.50	69112	5.41	25.01	69112	5.41	12.71	69112	5.41	26.72

Problème intégré															
Instance	SP1			SP2			SP3			SP4			SP5		
	UB	G	A	UB	G	A	UB	G	A	UB	G	A	UB	G	A
1	13476	7.31	0.00	13476	7.31	0.00	13476	7.31	0.00	13476	7.31	0.00	13476	7.31	0.00
2	12654	2.20	0.00	12688	2.48	0.00	12668	2.32	0.00	12688	2.48	0.00	12668	2.32	0.00
3	12784	2.63	0.00	12688	1.85	0.00	12784	2.63	0.00	12688	1.85	0.00	12638	1.45	0.00
4	13476	8.84	0.00	12638	2.08	0.00	13145	6.17	0.00	12638	2.08	0.00	12638	2.08	0.00
5	13476	10.03	0.00	12844	4.87	0.00	13149	7.36	2.43	12806	4.56	0.30	12845	4.87	0.00
6	32060	-	0.00	32060	-	0.00	32060	-	0.00	32060	-	0.00	32060	-	0.00
7	32060	-	0.00	32060	-	0.00	32060	-	0.00	32060	-	0.00	32060	-	0.00
8	32060	-	0.00	32060	-	0.00	32060	-	0.00	32060	-	0.00	32060	-	0.00
9	32060	-	0.00	32060	-	0.00	32060	-	0.00	32060	-	0.00	32060	-	0.00
10	32060	-	0.00	32060	-	0.00	32060	-	0.00	32060	-	0.00	32060	-	0.00
11	69112	-	0.00	69112	-	0.00	69112	-	0.00	69112	-	0.00	69112	-	0.00
12	69112	-	0.00	69112	-	0.00	69112	-	0.00	69112	-	0.00	69112	-	0.00
13	69112	-	0.00	69112	-	0.00	69112	-	0.00	69112	-	0.00	69112	-	0.00
14	69112	-	0.00	69112	-	0.00	69112	-	0.00	69112	-	0.00	69112	-	0.00
15	69112	-	0.00	69112	-	0.00	69112	-	0.00	69112	-	0.00	69112	-	0.00

TABLEAU 4.20 – Résultats pour la nomenclature 10x10-2 avec l’algorithme glouton

Application de l’algorithme ascendant

Les résultats avec l’algorithme ascendant sont présentés dans le Tableau 4.21. Des solutions différentes du plan initial sont trouvées pour toutes les instances avec toutes les stratégies validant la capacité après la nomenclature (SP2, SP4 et SP5). La stratégie SP1 bloque sur les instances 1, 4, 5, 7, 8 et 14. La stratégie SP3 bloque sur les instances 5 et 7.

La performance de l’approche avec l’algorithme ascendant est donc meilleure que celles des deux autres algorithmes. L’écart moyen sur la solution du solveur commercial est amélioré de 16.51%, 42.54%, 29.94%, 48.25% et 44.47%, par rapport à l’algorithme glouton, avec SP1, SP2, SP3, SP4 et SP5 respectivement. La meilleure qualité est obtenue avec SP4, avec $\bar{G} = 2.36\%$, et la pire avec SP1, avec $\bar{G} = 4.50\%$. La performance est aussi améliorée par rapport aux temps

Problème à séquence fixée															
Instance	SP1			SP2			SP3			SP4			SP5		
	UB	G	t(s)	UB	G	t(s)	UB	G	t(s)	UB	G	t(s)	UB	G	t(s)
1	13476	7.34	3.63	12713	1.26	2.14	13072	4.12	3.62	12713	1.26	2.25	12903	2.77	2.81
2	12638	1.70	3.93	12638	1.70	2.17	12638	1.70	3.68	12638	1.70	2.30	12638	1.70	5.33
3	12638	1.70	3.83	12638	1.70	2.09	12638	1.70	3.53	12638	1.70	2.24	12638	1.70	2.80
4	13476	8.84	3.90	12688	2.48	2.03	13045	5.36	3.49	12638	2.08	2.26	12638	2.08	2.73
5	13476	8.84	3.85	12806	3.43	1.97	13476	8.84	3.43	12638	2.08	2.21	12638	2.08	2.68
6	31448	2,87	16,41	31207	2,08	6,07	31448	2,87	10,45	31204	2,07	6,70	31445	2,86	13,09
7	32060	5.09	2.21	31226	2.36	1.83	32060	5.09	2.21	31173	2.19	1.76	31173	2.19	2.05
8	32060	4.96	2.14	31226	2.23	2.11	31238	2.27	2.28	31173	2.05	1.81	31173	2.05	2.31
9	31516	3.91	2.73	31315	3.25	2.62	31315	3.25	2.61	31173	2.78	2.50	31173	2.78	2.52
10	31512	4.14	2.86	31476	4.03	2.50	31533	4.21	2.57	31173	3.02	2.22	31173	3.02	2.64
11	68198	3.04	7.17	67789	2.42	8.08	67877	2.55	14.37	67789	2.42	7.03	67789	2.42	10.90
12	68166	3.25	6.46	67847	2.76	4.82	67941	2.91	5.76	67789	2.68	4.19	67789	2.68	6.04
13	67850	2.85	7.36	67847	2.84	7.07	67850	2.85	10.34	67789	2.75	6.20	67789	2.75	12.08
14	69112	5.21	9.13	67850	3.29	6.60	67850	3.29	9.80	67789	3.19	6.18	67789	3.19	11.78
15	67986	3.70	9.01	67850	3.49	7.33	68010	3.73	10.19	67789	3.40	6.89	67789	3.40	13.86

Problème intégré															
Instance	SP1			SP2			SP3			SP4			SP5		
	UB	G	A	UB	G	A	UB	G	A	UB	G	A	UB	G	A
1	12948	3.11	3.92	12663	0.84	0.39	12933	2.99	1.06	12713	1.23	0.00	12903	2.75	0.00
2	12638	2.08	0.00	12638	2.08	0.00	12638	2.08	0.00	12638	2.08	0.00	12638	2.08	0.00
3	12638	1.45	0.00	12638	1.45	0.00	12638	1.45	0.00	12638	1.45	0.00	12638	1.45	0.00
4	13476	8.84	0.00	12688	2.48	0.00	13045	5.36	0.00	12638	2.08	0.00	12638	2.08	0.00
5	13476	10.03	0.00	12806	4.56	0.00	13045	6.51	3.20	12638	3.18	0.00	12638	3.18	0.00
6	31448	-	0.00	31207	-	0.00	31448	-	0.00	31204	-	0.00	31441	-	0.01
7	32060	-	0.00	31226	-	0.00	32060	-	0.00	31173	-	0.00	31173	-	0.00
8	31105	-	2.98	31145	-	0.26	31226	-	0.04	31173	-	0.00	31173	-	0.00
9	31315	-	0.64	31305	-	0.03	31305	-	0.03	31173	-	0.00	31173	-	0.00
10	31465	-	0.15	31384	-	0.29	31309	-	0.71	31173	-	0.00	31173	-	0.00
11	67931	-	0.39	67789	-	0.00	67873	-	0.01	67789	-	0.00	67789	-	0.00
12	67850	-	0.46	67847	-	0.00	67852	-	0.13	67789	-	0.00	67789	-	0.00
13	67850	-	0.00	67789	-	0.09	67850	-	0.00	67789	-	0.00	67789	-	0.00
14	67850	-	1.83	67850	-	0.00	67850	-	0.00	67789	-	0.00	67789	-	0.00
15	67986	-	0.00	67789	-	0.09	67931	-	0.12	67789	-	0.00	67789	-	0.00

TABLEAU 4.21 – Résultats pour la nomenclature 10x10-2 avec l’algorithme ascendant

de calcul qui diminuent en moyenne de 32.21%, 59.72%, 50.21%, 39.13% et 42.65%, avec SP1, SP2, SP3, SP4 et SP5 respectivement. Le plus petit temps moyen de calcul (3.78 secondes) est obtenu avec SP4 et le plus grand avec SP5 (6.24 secondes). En dernier constat, on notera que la performance globale est améliorée lorsque l’on autorise la violation du deuxième type de contrainte, aussi bien en temps de calcul qu’en qualité de solution.

Concernant le problème intégré, plusieurs améliorations sont obtenues avec SP1, SP2 et SP3, mais SP4 reste la méthode la plus performante, avec un écart moyen par rapport aux solutions du solveur pour $T = 5$ de 2.00%. L’approche intégrée est globalement plus avantageuse qu’IBM ILOG CPLEX, étant donné que ce dernier ne trouve pas des solutions optimales pour les instances avec 10 et 20 périodes.

4.4.2.3 Nomenclature 10x10-3

Dans la nomenclature 10x10-3 (Figure 4.21), nous avons deux produits à répartir en deux structures indépendantes, chacune avec 3 niveaux et 5 produits, dont un produit fini et deux composants basiques. Les résultats obtenus par le solveur sont affichés dans le Tableau 4.22. Une nouvelle fois, les instances avec 5 et 10 périodes sont résolues de façon optimale pour le problème à séquence fixée, contrairement à celles avec 20 périodes. Seules les instances avec $T = 5$ sont résolues pour le problème intégrée, et celles-ci correspondent aux solutions optimales.

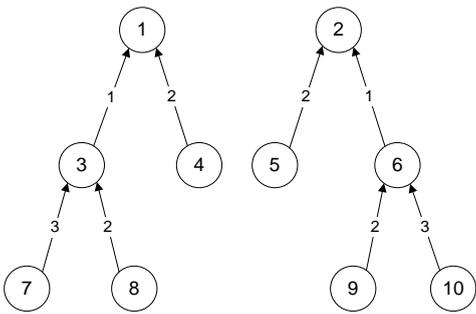


FIGURE 4.21 – Nomenclature 10x10-3

Instance	cap	T	ALB	CPL1	CPL2
1	0.60	5	7524	8195*	8080*
2	0.65			8178*	8080*
3	0.70			8080*	8080*
4	0.75			8080*	8080*
5	0.80			8080*	8080*
6	0.60	10	14793	18560*	-
7	0.65			18425*	-
8	0.70			18491*	-
9	0.85			18364*	-
10	0.80			18302*	-
11	0.60	20	21741	40076	-
12	0.65			40004	-
13	0.70			39953	-
14	0.75			39819	-
15	0.80			39938	-

TABIEAU 4.22 – Solutions obtenues avec IBM ILOG CPLEX pour la nomenclature 10x10-3

Application de l'algorithme glouton

Les résultats de notre approche avec l'algorithme glouton sont présentés dans le Tableau 4.23. Pour la plupart des instances, la solution trouvée est le plan de production initial. La première (avec SP5), la troisième, la quatrième et la cinquième (cette dernière avec SP4 et SP5) instances avec $T = 5$ ont pu être résolues grâce au lissage, permettant d'obtenir dans la plupart des cas la solution optimale. Les écarts entre les bornes supérieures et les solutions déterminées par le solveur sont en moyenne relativement élevés. SP5 est la meilleure stratégie en qualité de solution, avec un écart moyen de 8.22%, et SP4 occupe la deuxième place avec $\bar{G} = 8.92\%$. Les stratégies restantes offrent un écart moyen de 9.96%. En temps de calcul, SP1 est la stratégie la plus rapide, avec 4.16 secondes de en moyenne, et SP3 est la plus lente, avec $\bar{t} = 6.69$ secondes.

Problème à séquence fixée															
Instance	SP1			SP2			SP3			SP4			SP5		
	UB	G	t(s)	UB	G	t(s)	UB	G	t(s)	UB	G	t(s)	UB	G	t(s)
1	9344	14.02	2.85	9344	14.02	2.91	9344	14.02	2.93	9344	14.02	2.82	8481	3.49	2.81
2	9344	14.26	3.03	9344	14.26	3.07	9344	14.26	3.07	9344	14.26	2.99	9344	14.26	2.98
3	8080*	0.00	3.19	8080*	0.00	3.18	8080*	0.00	3.28	8080*	0.00	3.04	8080*	0.00	2.95
4	8080*	0.00	3.93	8080*	0.00	3.94	8080*	0.00	3.95	8080*	0.00	3.77	8080*	0.00	3.67
5	9344	15.64	4.21	9344	15.64	4.23	9344	15.64	4.23	8080*	0.00	3.76	8080*	0.00	3.67
6	20412	9.98	3.16	20412	9.98	3.39	20412	9.98	3.43	20412	9.98	2.42	20412	9.98	3.50
7	20412	10.78	3.39	20412	10.78	3.49	20412	10.78	3.59	20412	10.78	2.49	20412	10.78	3.92
8	20412	10.39	3.18	20412	10.39	3.58	20412	10.39	3.63	20412	10.39	2.49	20412	10.39	3.64
9	20412	11.15	6.77	20412	11.15	7.34	20412	11.15	7.26	20412	11.15	5.17	20412	11.15	6.99
10	20412	11.53	3.12	20412	11.53	3.24	20412	11.53	3.19	20412	11.53	2.37	20412	11.53	3.00
11	44088	10.01	5.51	44088	10.01	20.67	44088	10.01	28.79	44088	10.01	17.53	44088	10.01	20.75
12	44088	10.21	6.48	44088	10.21	12.45	44088	10.21	16.00	44088	10.21	10.02	44088	10.21	9.78
13	44088	10.35	5.58	44088	10.35	7.49	44088	10.35	7.12	44088	10.35	5.67	44088	10.35	7.55
14	44088	10.72	4.65	44088	10.72	5.46	44088	10.72	5.77	44088	10.72	4.74	44088	10.72	5.73
15	44088	10.39	3.32	44088	10.39	4.03	44088	10.39	4.10	44088	10.39	3.79	44088	10.39	5.77

Problème intégré															
Instance	SP1			SP2			SP3			SP4			SP5		
	UB	G	A	UB	G	A	UB	G	A	UB	G	A	UB	G	A
1	9344	15.64	0.00	8429	4.32	9.79	8481	4.96	9.24	9344	15.64	0.00	8481	4.96	0.00
2	9344	15.64	0.00	8429	4.32	9.79	9344	15.64	0.00	9344	15.64	0.00	9344	15.64	0.00
3	8080*	0.00	0.00	8080*	0.00	0.00	8080*	0.00	0.00	8080*	0.00	0.00	8080*	0.00	0.00
4	8080*	0.00	0.00	8080*	0.00	0.00	8080*	0.00	0.00	8080*	0.00	0.00	8080*	0.00	0.00
5	9344	15.64	0.00	8080*	0.00	13.53	9344	15.64	0.00	8080*	0.00	0.00	8080*	0.00	0.00
6	20412	-	0.00	20412	-	0.00	20412	-	0.00	20412	-	0.00	20412	-	0.00
7	20412	-	0.00	20412	-	0.00	20412	-	0.00	20412	-	0.00	20412	-	0.00
8	20412	-	0.00	20412	-	0.00	20412	-	0.00	20412	-	0.00	20412	-	0.00
9	20412	-	0.00	20412	-	0.00	20412	-	0.00	20412	-	0.00	20412	-	0.00
10	20412	-	0.00	20412	-	0.00	20412	-	0.00	20412	-	0.00	20412	-	0.00
11	44088	-	0.00	44088	-	0.00	44088	-	0.00	44088	-	0.00	44088	-	0.00
12	44088	-	0.00	44088	-	0.00	44088	-	0.00	44088	-	0.00	44088	-	0.00
13	44088	-	0.00	44088	-	0.00	44088	-	0.00	44088	-	0.00	44088	-	0.00
14	44088	-	0.00	44088	-	0.00	44088	-	0.00	44088	-	0.00	44088	-	0.00
15	44088	-	0.00	44088	-	0.00	44088	-	0.00	44088	-	0.00	44088	-	0.00

TABLEAU 4.23 – Résultats pour la nomenclature 10x10-3 avec l’algorithme glouton

Concernant le problème intégré, des fortes améliorations sont réalisées avec SP2 pour les instances avec 5 périodes, permettant de réduire l’écart moyen par rapport aux solutions du solveur (pour $T = 5$) à 1.73%. SP2 est par conséquent la méthode la plus performante. Des comparaisons avec le solveur ne peuvent pas être effectuées pour les instances avec 10 et 20 périodes, car celui-ci ne trouve même pas de solutions réalisables.

Application de l’algorithme ascendant

Enfin, les résultats avec l’algorithme ascendant sont présentés dans le Tableau 4.24. Une fois de plus, cet algorithme permet d’éliminer le problème de blocage et réussit à déterminer des solutions meilleures que le plan initial avec toutes les stratégies, hormis SP1, qui bloque sur la

première et la deuxième instance avec $T = 5$, la quatrième instance avec $T = 10$ ainsi que la première, la deuxième et la cinquième instances avec $T = 20$. Les solutions sont significativement améliorées avec toutes les stratégies, les écarts moyens diminuant de 25.00%, 57.33%, 56.43%, 54.82% et 51.09% avec SP1, SP2, SP3, SP4 et SP5 respectivement, par rapport aux écarts de l'algorithme glouton. L'écart moyen le plus petit est de 4.02% et est obtenu avec SP5, mais SP4 offre aussi une bonne performance avec $\bar{G} = 4.03\%$. Les temps moyens de calcul sont aussi réduits (entre 7.79% et 34.58%), sauf pour SP1, où l'on passe de 4.16 secondes à 5.45 secondes. La stratégie la plus rapide est SP2 avec $\bar{t} = 3.86$ secondes, et la plus lente est SP3 avec $\bar{t} = 5.80$ secondes. En considérant qualité de solution et temps de calcul, SP4 est la stratégie la plus performante.

Problème à séquence fixée															
Instance	SP1			SP2			SP3			SP4			SP5		
	UB	G	t(s)	UB	G	t(s)	UB	G	t(s)	UB	G	t(s)	UB	G	t(s)
1	9344	14.02	3.73	8394	2.43	1.78	8394	2.43	3.21	8394	2.43	1.92	8394	2.43	2.92
2	9344	14.26	3.59	8394	2.64	1.83	8394	2.64	3.35	8394	2.64	2.00	8394	2.64	3.17
3	8352	3.37	3.50	8352	3.37	1.81	8352	3.37	3.17	8352	3.37	1.95	8352	3.37	3.33
4	8352	3.37	4.36	8352	3.37	1.73	8352	3.37	4.09	8352	3.37	1.83	8352	3.37	3.89
5	8605	6.50	4.36	8605	6.50	1.75	8605	6.50	4.12	8352	3.37	1.86	8352	3.37	3.94
6	19431	4.69	1.54	19351	4.26	4.09	19431	4.69	2.07	19351	4.26	4.32	19333	4.16	3.26
7	19219	4.31	1.74	19198	4.20	4.27	19317	4.84	2.17	19198	4.20	4.47	19198	4.20	3.73
8	19274	4.23	1.62	19192	3.79	4.23	19197	3.82	2.17	19192	3.79	4.52	19177	3.71	3.29
9	20412	11.15	2.85	19151	4.29	4.15	19151	4.29	2.84	19151	4.29	4.44	19151	4.29	7.14
10	19278	5.33	1.54	19151	4.64	4.17	19151	4.64	1.65	19151	4.64	4.52	19151	4.64	3.09
11	44088	10.01	5.15	42011	4.83	6.08	41973	4.73	10.76	41935	4.64	5.17	41935	4.64	13.98
12	44088	10.21	5.26	41876	4.68	6.91	41909	4.76	7.41	41876	4.68	6.55	41869	4.66	10.20
13	41869	4.80	5.56	41872	4.80	5.37	41869	4.80	5.26	41872	4.80	5.47	41869	4.80	6.97
14	41949	5.35	18.97	41872	5.16	4.84	41916	5.27	17.18	41872	5.16	5.11	41869	5.15	5.63
15	44088	10.39	18.02	41872	4.84	4.85	41892	4.89	17.56	41872	4.84	5.08	41869	4.83	5.41

Problème intégré															
Instance	SP1			SP2			SP3			SP4			SP5		
	UB	G	A	UB	G	A	UB	G	A	UB	G	A	UB	G	A
1	8394	3.89	10.17	8394	3.89	0.00	8394	3.89	0.00	8394	3.89	0.00	8394	3.89	0.00
2	8402	3.99	10.08	8394	3.89	0.00	8394	3.89	0.00	8388	3.81	0.07	8394	3.89	0.00
3	8352	3.37	0.00	8352	3.37	0.00	8352	3.37	0.00	8352	3.37	0.00	8352	3.37	0.00
4	8352	3.37	0.00	8352	3.37	0.00	8352	3.37	0.00	8352	3.37	0.00	8352	3.37	0.00
5	8352	3.37	2.94	8605	6.50	0.00	8352	3.37	2.94	8352	3.37	0.00	8352	3.37	0.00
6	19320	-	0.57	19295	-	0.29	19338	-	0.48	19252	-	0.51	19295	-	0.20
7	19197	-	0.11	19177	-	0.11	19177	-	0.72	19180	-	0.09	19177	-	0.11
8	19180	-	0.49	19177	-	0.08	19177	-	0.10	19137	-	0.29	19163	-	0.07
9	19456	-	4.68	19151	-	0.00	19151	-	0.00	19037	-	0.60	19151	-	0.00
10	19278	-	0.00	19151	-	0.00	19151	-	0.00	19151	-	0.00	19151	-	0.00
11	42190	-	4.31	41967	-	0.10	41965	-	0.02	41925	-	0.02	41935	-	0.00
12	44088	-	0.00	41876	-	0.00	41908	-	0.00	41675	-	0.48	41869	-	0.00
13	41869	-	0.00	41872	-	0.00	41869	-	0.00	41872	-	0.00	41869	-	0.00
14	41949	-	0.00	41872	-	0.00	41889	-	0.06	41578	-	0.70	41869	-	0.00
15	41869	-	5.03	41869	-	0.01	41869	-	0.05	41748	-	0.30	41869	-	0.00

TABLEAU 4.24 – Résultats pour la nomenclature 10x10-3 avec l'algorithme ascendant

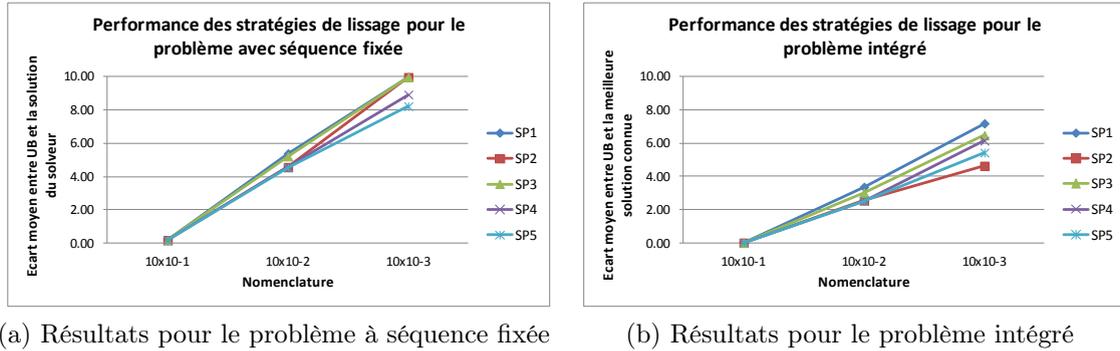
Concernant le problème intégré, des fortes améliorations sont réalisées avec SP1, mais la qualité globale des solutions est toujours la moins intéressante. Les meilleures solutions sont globalement obtenues avec SP4 et, comme pour les autres nomenclatures à 10 produits, l'approche intégrée est plus avantageuse que le solveur commercial, car ce dernier ne résout pas la plupart des instances.

4.4.2.4 Bilan des expérimentations avec des job-shops 10x10

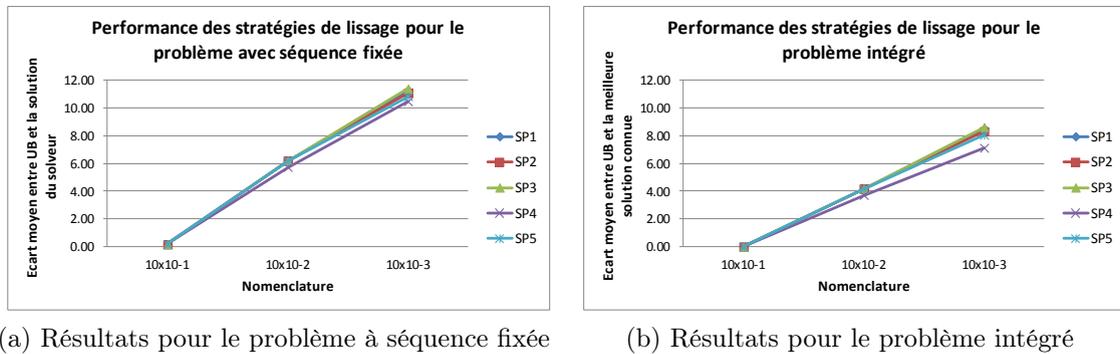
Nous avons résolu le problème de planification et d'ordonnancement intégré associé à 3 nomenclatures différentes, avec 5 stratégies de lissage et 3 algorithmes pour la satisfaction des contraintes de nomenclature. Nous pouvons conclure sur le comportement global de l'approche somme suit. Considérons d'abord l'algorithme glouton, pour lequel une synthèse des résultats est présentée dans la Figure 4.22. Comme IBM ILOG CPLEX ne trouve pas de solutions réalisables pour la plupart des instances, les écarts moyens associés au problème intégré ont été calculés par rapport à la meilleure solution connue, parmi tous les algorithmes et stratégies de lissage. Nous pouvons constater que :

- Bien que le problème associé à la nomenclature 10x10-1 est difficile à résoudre, le plan initial correspond à une solution proche de l'optimum dans le cas avec séquence fixée. Pour ce qui est du problème intégré, aucune stratégie ne permet d'améliorer le plan initial,
- Les écarts les plus importants en qualité de solution sont obtenus avec la nomenclature 10x10-3,
- Les stratégies qui commencent par satisfaire les contraintes de nomenclature donnent de meilleurs résultats. SP5 est la stratégie la plus performante pour le problème avec séquence fixée et SP2 est plus avantageuse pour le problème intégré.
- Mis à part la nomenclature 10x10-3, il n'y a pas de différence entre le fait d'interdire ou d'autoriser la violation des contraintes de capacité pendant la validation des contraintes de nomenclature. En effet, SP2 et SP4 offrent la même performance. Cependant, avec la nomenclature 10x10-3, le problème avec séquence fixée est mieux résolu avec SP2, tandis que SP4 donne de meilleures solutions pour le problème intégré.
- Si l'on satisfait en premier les contraintes de capacité, il est préférable d'autoriser la violation des contraintes de nomenclature. SP3 offre une meilleure performance que SP1 pour le problème intégré.

Considérons maintenant les résultats obtenus avec l'algorithme descendant, dont une synthèse est présentée dans la Figure 4.23. À nouveau, les écarts moyens associés au problème intégré ont été calculés par rapport à la meilleure solution connue, parmi tous les algorithmes et stratégies de lissage. Nous constatons que :

FIGURE 4.22 – Synthèse des résultats pour les nomenclatures 10×10 avec l’algorithme glouton

- Il n’y a quasiment pas de différence entre les performances des stratégies de lissage, car la solution finale correspond la plupart du temps au plan initial,
- Les écarts les plus importants sont générés en résolvant le problème associé à la nomenclature 10×10^{-3} ,
- SP4 est la stratégie de lissage la plus performante.

FIGURE 4.23 – Synthèse des résultats pour les nomenclatures 10×10 avec l’algorithme descendant

En ce qui concerne l’application de l’algorithme ascendant, une synthèse des résultats est présentée dans la Figure 4.24. Les écarts moyens associés au problème intégré ont été calculés par rapport à la meilleure solution connue, parmi tous les algorithmes et stratégies de lissage. Nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- Des solutions différentes du plan initial sont obtenues avec toutes les stratégies de lissage,

- Les écarts sur la qualité de solution les plus importants sont générés avec la nomenclature 10×10^{-3} , mais ils sont réduits en résolvant le problème intégré,
- Il est plus avantageux de satisfaire en premier les contraintes de nomenclature, SP2, SP4 et SP5 étant les stratégies de lissage les plus performantes,
- Il est préférable d'autoriser la violation des contraintes de capacité pendant la validation des contraintes de nomenclature, SP4 étant supérieure à SP2,
- Si l'on commence par satisfaire les contraintes de capacité, il est plus avantageux d'autoriser la violation des contraintes de nomenclature. La performance de SP3 est significativement supérieure à celle de SP1, particulièrement avec la nomenclature 10×10^{-3} .

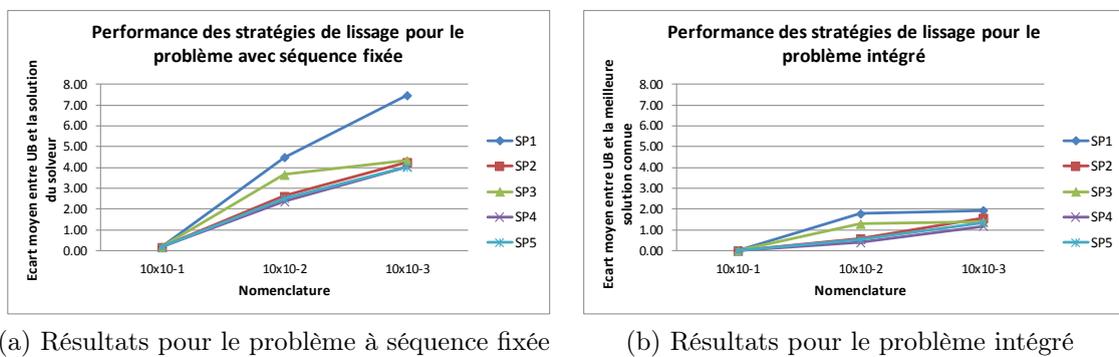


FIGURE 4.24 – Synthèse des résultats pour les nomenclatures 10×10 avec l'algorithme ascendant

Finalement, une synthèse des résultats permettant de comparer les 3 algorithmes de validation des contraintes de nomenclature est présentée dans la Figure 4.25. Nous présentons les écarts moyens entre les bornes supérieures et les meilleures solutions trouvées pour l'ensemble des nomenclatures 10×10 . Nous pouvons constater que :

- L'algorithme ascendant offre globalement la meilleure performance et permet de trouver des solutions réalisables différentes du plan initial,
- L'algorithme glouton et l'algorithme descendant ne sont pas appropriés, car ils ne permettent pas de toujours trouver des solutions réalisables. La plupart du temps, les solutions proposées correspondent au plan initial,
- Il est plus avantageux de satisfaire en premier les contraintes de nomenclature, SP2, SP4 et SP5 étant les stratégies de lissage les plus performantes,
- SP1 est globalement la stratégie de lissage la moins performante, et il ne faut pas l'utiliser avec l'algorithme ascendant. Cependant, l'écart est réduit en résolvant le problème intégré.

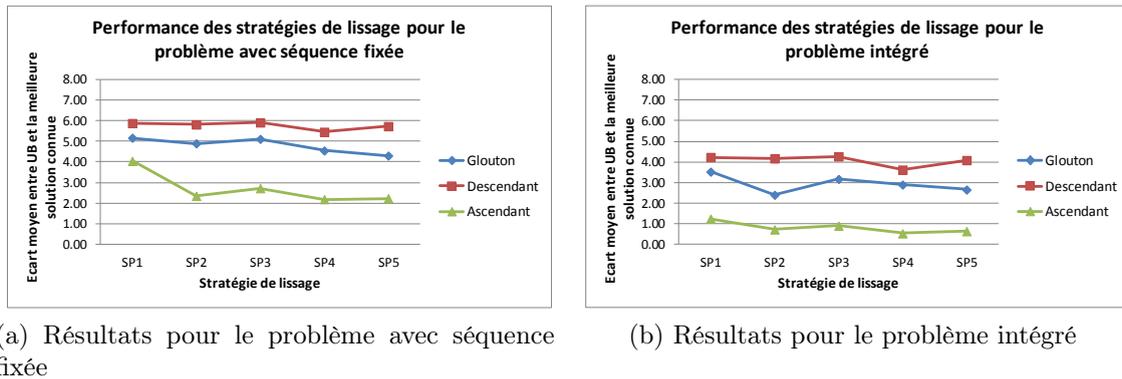


FIGURE 4.25 – Comparaison des algorithmes de validation des contraintes de nomenclature pour les nomenclatures 10x10

4.5 Conclusion

Nous avons présenté une extension de l'approche intégrée permettant de résoudre des problèmes de dimensionnement de lots et d'ordonnancement dans des systèmes de production à plusieurs niveaux, configurés comme des ateliers de type job-shop. Cette méthode permet de trouver des solutions réalisables tenant compte de la capacité détaillée au niveau opérationnel et des liens de nomenclature entre les produits composants et composés.

De manière similaire à l'approche pour des problèmes mono-niveau, nous avons implémenté une heuristique Lagrangienne pour résoudre le problème de planification à séquence fixée et une méthode d'amélioration de la séquence guidée par une recherche taboue. Nous avons utilisé une nouvelle formulation basée sur le concept d'échelon stock, afin de réduire la difficulté de résolution du problème. Cette stratégie nous a permis de continuer à utiliser la propriété de Wagner-Whitin. Comme de nouvelles contraintes (nomenclature) sont relâchées, nous avons proposé plusieurs stratégies de lissage afin de satisfaire les deux types de contraintes. Nous avons également proposé plusieurs algorithmes de satisfaction des contraintes de nomenclature.

Une analyse de la performance de l'approche intégrée avec l'utilisation des différentes stratégies de lissage et des différents algorithmes a été menée, en la comparant à la performance du solveur standard IBM ILOG CPLEX Optimization Studio 12.6. Sur des problèmes de taille relativement petite, la performance de notre approche et celle du solveur sont très bonnes. Le modèle intégré est résolu de façon optimale par le solveur et nos solutions ont des écarts très petits par rapport à l'optimum. Pour des problèmes de grande taille, le solveur n'est pas capable

de résoudre la plupart des instances et même de trouver des solutions réalisables, tandis que notre approche détermine des solutions réalisables pour toutes les instances.

Parmi les algorithmes que nous avons proposés pour la validation des contraintes de nomenclature, l'algorithme glouton est le plus efficace pour les nomenclatures de petite taille (6 produits) ; tandis que l'algorithme ascendant (logique opposée à MRP) s'avère plus efficace pour les nomenclatures de grande taille (10 produits). En analysant les stratégies de lissage, nous avons constaté qu'il est plus avantageux de satisfaire les contraintes de nomenclature avant celles de capacité et qu'il est préférable, dans la plupart des cas, d'autoriser la violation des contraintes de capacité pendant la validation des contraintes de nomenclature.