

Projet 2

Dufrane Melvin, Watiotienne Henry

July 14, 2024

Table des matières

1	Introduction et objectif de l'analyse	2
2	Présentation du problème initial	2
3	Modélisation Mathématique	3
3.1	Déclaration des ensembles	3
3.2	Déclaration des paramètres	3
3.3	Déclaration des variables	3
3.4	Fonction objectif à maximiser	3
3.5	Contraintes	4
3.6	Quelques statistiques descriptives	5
4	Résultats et interprétation	8
4.1	Résultats	8
4.2	Variables d'écart	10
5	Évolution possible de divers paramètres	11
5.1	Augmentation de la capacité de stockage	11
5.1.1	Augmentation de 100 unités de stockage par produit	12
5.1.2	Augmentation de 500 unités de stockage par produit	13
5.1.3	Augmentation de 1100 unités de stockage par produit	14
5.2	Achat d'une nouvelle machine	15
6	Optimisation du planning de maintenance	17
6.1	Implémentation en langage AMPL des modifications	17
6.1.1	Les nouveaux ensembles	17
6.1.2	Modification des paramètres	17
6.1.3	Ajout d'une nouvelle variable	17
6.1.4	Les nouvelles contraintes	18
6.2	Résultats et interprétations	19
6.2.1	Remarque	20
6.3	Variables d'écart	21
7	Achat éventuel de nouvelles machines	22
7.1	Achat d'une Foreuse Horizontale	23
7.2	Achat d'un Alésoir	24
7.3	Achat d'une Raboteuse	25
7.4	Achat d'une Foreuse Verticale	26
7.5	Achat d'une Broyeuse	27
8	Conclusion	29
9	Annexes	30

1 Introduction et objectif de l'analyse

La recherche opérationnelle est une approche incontournable dans la résolution de problèmes complexes pour les entreprises et les organisations. Elle repose sur l'application de techniques mathématiques et informatiques avancées pour parvenir à des décisions éclairées. Dans le cadre de cette étude, nous ferons appel au logiciel AMPL, un outil puissant dédié à la résolution de problèmes d'optimisation.

L'objectif fondamental de ce rapport est de présenter des recommandations stratégiques, visant à optimiser l'utilisation de chaque machine sur chaque mois afin de produire en quantité optimale les différents produits pour notre usine. Notre but est de parvenir à une maximisation des profits de cette dernière. Nous explorerons en profondeur les opportunités d'amélioration, en utilisant AMPL comme un atout essentiel dans la résolution de ce problème. Grâce à cette approche, nous mettrons en lumière des solutions fondées sur des données concrètes.

2 Présentation du problème initial

Une usine fabrique sept produits (PROD1 à PROD7) au moyen des machines suivantes : quatre broyeuses, deux foreuses verticales, trois foreuses horizontales, un alésoir et une raboteuse. Le tableau suivant donne le prix de vente unitaire des produits fabriqués (en euros) ainsi que le nombre d'heures d'utilisation nécessaire sur chaque type de machine. Un tiret dans cette table signifie que le produit ne passe sur cette machine :

	PROD1	PROD2	PROD3	PROD4	PROD5	PROD6	PROD7
Prix de vente	10	6	8	4	11	9	3
Broyeuses	0.5	0.7	-	-	0.3	0.2	0.5
Foreuses verticales	0.1	0.2	-	0.3	-	0.6	-
Foreuses horizontales	0.2	-	0.8	-	-	-	0.6
Alésoirs	0.05	0.03	-	0.07	0.1	-	0.08
Raboteuses	-	-	0.01	-	0.05	-	0.05

Table 1: Tableau de production

Chaque mois, certaines machines doivent être arrêtées pour maintenance. Voici le planning de maintenance :

Mois	Maintenance
Janvier	1 broyeuse
Février	2 foreuses horizontales
Mars	1 alésoir
Avril	1 foreuse verticale
Mai	1 broyeuse et 1 foreuse horizontale
Juin	1 raboteuse et 1 foreuse verticale

Table 2: Planning de Maintenance

Le nombre de produits qu'il est possible de vendre chaque mois est limité. Voici ces limitations :

Vente max	PROD1	PROD2	PROD3	PROD4	PROD5	PROD6	PROD7
Janvier	500	1000	300	300	800	200	100
Février	600	500	200	0	400	300	150
Mars	300	600	0	0	500	400	100
Avril	200	300	400	500	200	0	100
Mai	0	100	500	100	1000	300	0
Juin	500	500	100	300	1100	500	60

Table 3: Limitations des Ventes par Mois

Il est possible de stocker jusqu'à 100 unités de chaque produit au coût de 50 centimes d'euros par unité et par mois. Initialement, les stocks sont vides. On souhaite disposer d'un stock de 50 unités de chaque produit à la fin du mois de juin. L'usine fonctionne 6 jours par semaine et 8 heures par jour. On suppose que chaque mois comporte 24 jours ouvrés. Enfin, il n'y a aucun problème d'ordonnancement.

3 Modélisation Mathématique

3.1 Déclaration des ensembles

On a un total de 4 ensembles :

- PRODUITS contenant les produits que fabrique l'usine (PROD1 ... PROD7).
- MOIS (ordonné) contenant les différents mois sur lesquels nous étudions (de Janvier à Juin).
- MOISp (ordonné) contenant les différents mois sur lesquels nous étudions (de Janvier à Juin) plus le mois de juillet, c'est ensemble permet de faciliter l'écriture de certaines contraintes, notamment les stocks.
- MACHINES contenant les différents types de machines utilisées (Broyeuses ... Raboteuses).

3.2 Déclaration des paramètres

Nous avons différents paramètres, certains sont indexés par les ensembles définis précédemment, d'autres sont fixes, indépendamment du produit, de la machine ou du mois :

prixVente{PRODUITS} : Prix de vente unitaire pour chaque produit (constant par produit).

tempsUtilisation{PRODUITS, MACHINES} : Nombre d'heures d'utilisation de chaque machine par chaque produit.

maintenance{MACHINES, MOIS} : Nombre de machines de chaque type en maintenance par mois.

venteMax{PRODUITS, MOIS} : Quantité maximale de chaque produit vendable par mois.

nombre_machine{MACHINES} : Nombre total de machines de chaque type.

stockMax : Quantité maximale pouvant être stockée (100 pour chaque produit et chaque mois).

coutStockage : Coût unitaire de stockage de chaque produit (50 centimes d'euros).

stockFinal : Quantité en stock souhaitée à la fin de l'étude (50 de chaque produit).

nbHeuresParMois : Nombre d'heures d'activité de l'usine par mois (8 heures x 24 jours ouvrés).

3.3 Déclaration des variables

Nous définissons trois variables dans notre modèle. Premièrement, la variable "production" représentera les quantités produites de chaque produit pour chaque mois. Deuxièmement, la variable "vente" représentera les ventes mensuelles de chaque produit. Enfin, la variable "stock" indiquera les quantités stockées pour chaque produit au début de chaque mois (jusque Juillet qui contient donc les stocks de fin Juin). Bien que cette dernière variable puisse être dérivée des deux premières, son utilisation facilitera la compréhension et la gestion du modèle. De plus pour ces trois variables on rajoute une contraintes d'intégrité pour travailler avec des valeurs entières :

En AMPL :

```
1 var production {MOIS, PRODUITS} >= 0 integer;  
2 var stock {MOISp, PRODUITS} >= 0 integer;  
3 var vente {MOIS, PRODUITS} >= 0 integer;
```

3.4 Fonction objectif à maximiser

On cherche à maximiser le profit, qui est calculé comme le revenu généré par les ventes, c'est-à-dire le prix de vente du produit multiplié par la quantité vendue, auquel on soustrait le coût du stockage.

$$\max \sum_{p \in \text{PRODUITS}, m \in \text{MOIS}} (\text{prixVente}[p] \times \text{vente}[p, m]) - \sum_{p \in \text{PRODUITS}, m \in \text{MOIS}} (\text{coutStockage}[p, m] \times \text{stock}[p, m]) \quad (1)$$

En AMPL :

```
1 maximize ProfitTotal:  
2     sum {m in MOIS, p in PRODUITS} (prixVente[p] * vente[m,p])  
3     - sum {m in MOIS, p in PRODUITS} (coutStockage * stock[m,p]);
```

Nous ne sommes pas obligé de préciser le mois et le produit pour le coût de stockage puisqu'il est le même pour tous.

3.5 Contraintes

- **ContrainteTempsTotalMachine:** Cette contrainte vise à garantir que le temps total d'utilisation des machines par produit ne dépasse pas la durée de travail disponible, en tenant compte des machines en maintenance. Nous examinons le temps total d'utilisation par machine et par mois. Le temps total d'utilisation correspond au nombre d'heures pendant lesquelles une machine est utilisée, c'est-à-dire le temps nécessaire pour qu'une machine produise un produit, multiplié par le nombre de produits. Ce temps total d'utilisation doit être inférieur au temps disponible, c'est-à-dire le nombre d'heures par mois (24 jours * 8 heures) multiplié par le nombre de machines disponibles, c'est-à-dire le nombre total de machines moins celles en maintenance.

$$\sum_{p \in \text{PRODUITS}} \text{tempsUtilisation}_{p,ma} \times \text{production}_{m,p} \leq \text{nbHeuresParMois} \times (\text{nombre_machine}_{ma} - \text{maintenance}_{ma,m}) \quad (2)$$

En AMPL :

```
1 subject to ContrainteTempsTotalMachine {ma in MACHINES, m in MOIS}:
2   sum {p in PRODUITS} tempsUtilisation[p, ma] * production[m, p] <=
   nbHeuresParMois * (nombre_machine[ma] - maintenance[ma, m]);
```

- **StockInitial:** Cette contrainte définit le stock initial de chaque produit au début de la période de planification. Elle est utile pour initialiser le modèle.

$$\text{stock}_{\text{first}(\text{MOISp}),p} = 0 \quad (3)$$

En AMPL :

```
1 subject to StockInitial {p in PRODUITS}:
2   stock[first(MOISp),p] = 0; # Utilisation de first(MOISp) pour janvier
```

On rappelle que les stocks sont ceux en début de mois, par exemple en janvier on a 0 par l'initialisation mais si l'on souhaite connaître la quantité stockée en janvier il suffit de regarder celle en début de mois de février.

- **EquilibreStock:** Cette contrainte assure l'équilibre du stock en fin de mois, en prenant en compte la production et les ventes.

$$\text{stock}_{\text{next}(m,\text{MOISp}),p} = \text{stock}_{m,p} + \text{production}_{m,p} - \text{vente}_{m,p} \quad (4)$$

En AMPL :

```
1 subject to EquilibreStock {m in MOIS, p in PRODUITS}:
2   stock[next(m, MOISp), p] = stock[m, p] + production[m, p] - vente[m, p];
```

- **StockFinal:** Cette contrainte est pour respecter le souhait d'avoir 50 unités de chaque produit à la fin du mois de juin :

$$\text{stock}_{\text{last}(\text{MOISp}),p} \geq \text{stockFinal} \quad (5)$$

En AMPL :

```
1 subject to StockFinal {p in PRODUITS}:
2   stock[last(MOISp),p] >= stockFinal; # Utilisation de last(MOISp) pour juin
```

- **StockMax:** Cette contrainte permet de s'assurer que l'on ne dépasse pas la capacité de stockage disponible.

$$\text{stock}_{m,p} \leq \text{stockMax} \quad (6)$$

En AMPL :

```
1 subject to StockMax {m in MOISp, p in PRODUITS}:
2   stock[m,p] <= stockMax;
```

- **VenteMaxContrainte:** Cette contrainte permet de respecter les limitations sur les ventes maximales.

$$\text{vente}_{m,p} \leq \text{venteMax}_{p,m} \quad (7)$$

En AMPL :

```
1 subject to VenteMaxContrainte {m in MOIS, p in PRODUITS}:
2     vente[m,p] <= venteMax[p,m];
```

- **CouvertureVenteMoisSuivants:** Cette contrainte assure que ce que l'on vend est disponible, c'est-à-dire que l'on a produit suffisamment pour le premier mois (puisque l'on a pas encore de stock) ou que l'on a assez de produits et de stocks pour les autres mois.

$$\text{vente}_{m,p} \leq \text{production}_{m,p} + \max(0, \text{stock}_{\text{prev}(m, \text{MOISp}), p}) \quad (8)$$

En AMPL :

```
1 subject to CouvertureVenteMoisSuivants {m in MOIS, p in PRODUITS}:
2     vente[m, p] <= production[m, p] + (if m != first(MOISp) then stock[prev(m,
    MOISp), p] else 0);
```

3.6 Quelques statistiques descriptives

A partir des données connues sur le fonctionnement de l'usine, on peut étudier la répartition du temps de chaque produit sur chaque machine afin d'avoir une idée du produit qui prend le plus de temps à produire ou encore quelle machine est la plus utilisée et sur quel mois.

Commençons par regarder la répartition des prix de ventes des produits:

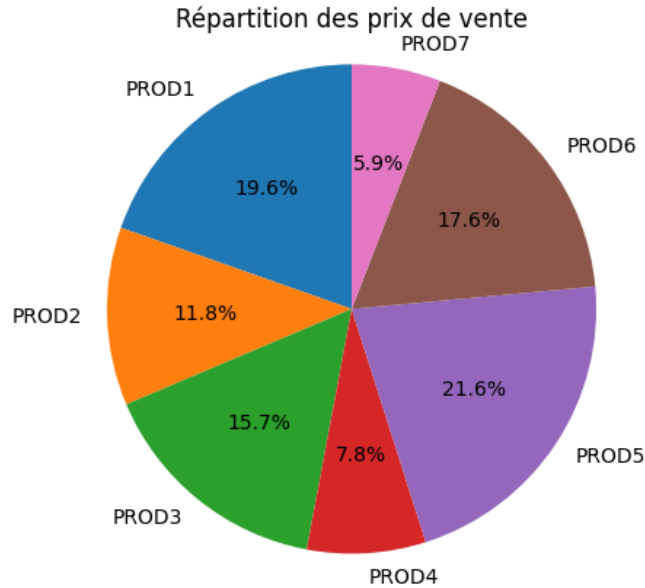


Figure 3.6.1: Répartition des prix de ventes par produits

Avec ce graphique, il est évident que le produit le plus intéressant à produire est le numéro 5. Par conséquent, on pourrait intuitivement anticiper une production importante de celui-ci, dans la limite des contraintes liées au stockage et à la capacité de production mensuelle. En revanche, pour le produit numéro 7 qui semble moins attractif

que les autres, on ne devrait pas anticiper une production aussi favorisée.

On s'intéresse maintenant aux limites de production mensuelles:

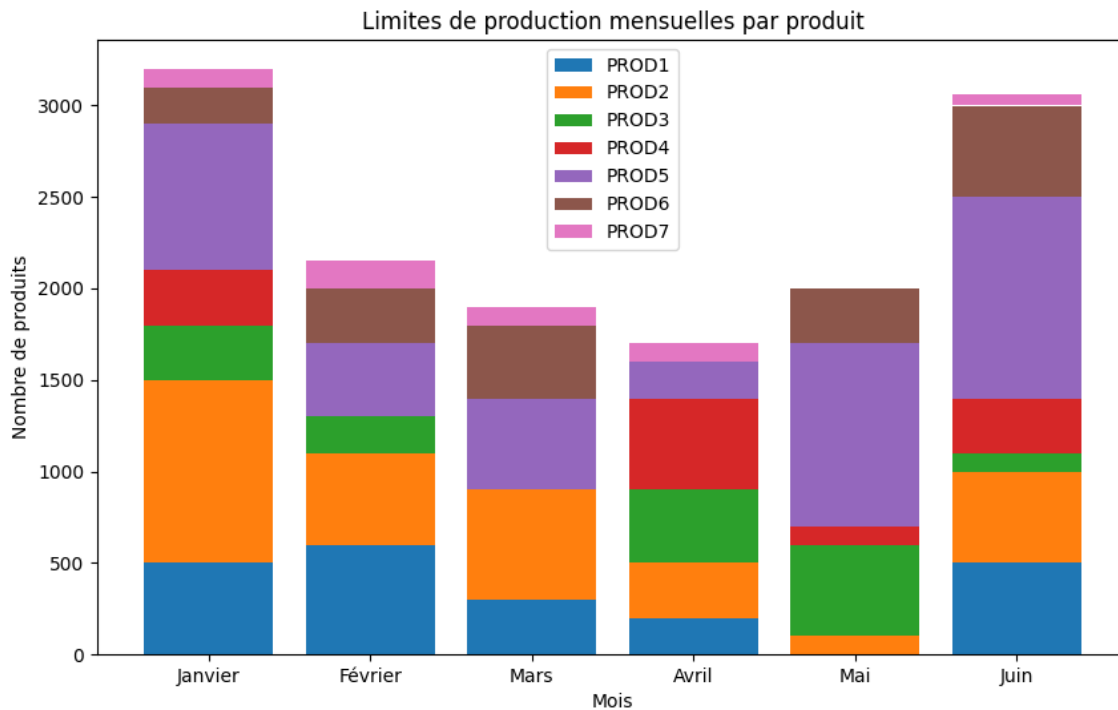


Figure 3.6.2: Limites de production mensuelles par produit

Il est à noter qu'une absence totale de vente est prévue pour certains produits au cours de certains mois. Par exemple, le produit 4 ne pourra être vendu ni en février ni en mars. Par ailleurs, le produit numéro 7, qui présente un intérêt moindre en termes de prix de vente, est également très limité en terme de quantité qu'il est possible de vendre, il sera donc certainement peu produit. En revanche, le produit 5, jugé plus attrayant en raison de son prix de vente, peut également être vendu en quantité plus importante tout au long des six mois. Cette constatation est prometteuse pour les bénéfices.

Comme mentionné précédemment, une contrainte majeure est le temps de production des produits. Nous allons visualiser les éventuels points de congestion susceptibles de se produire au niveau des machines.

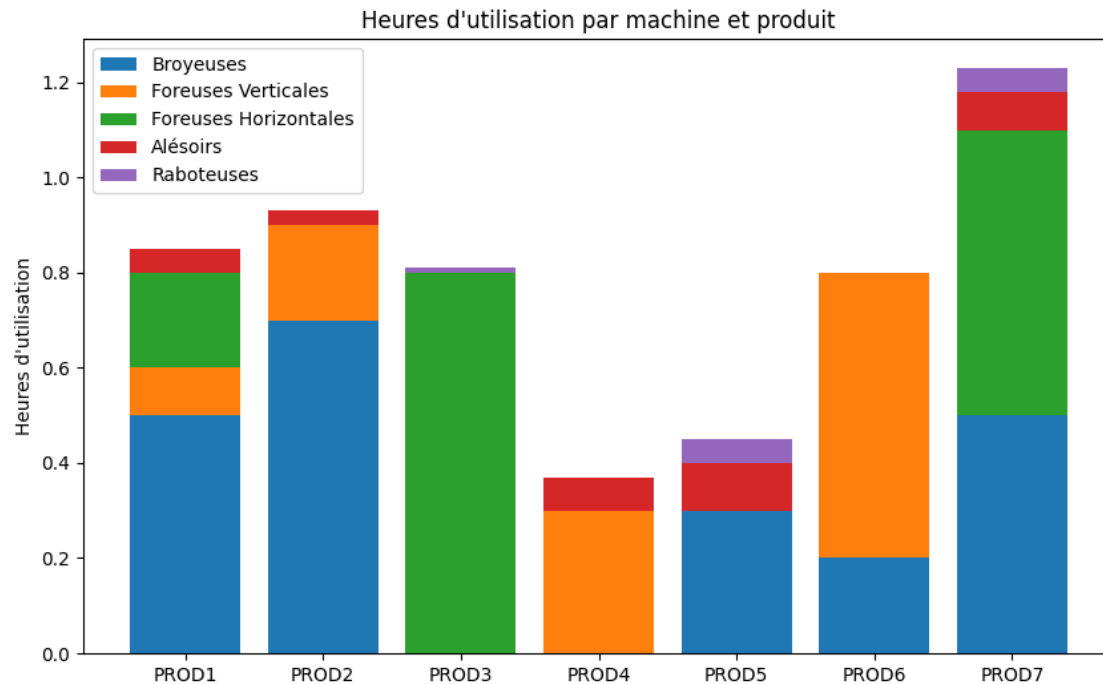


Figure 3.6.3: Temps d'utilisation par machine pour confectionner un produit

Il est évident dès le premier coup d'œil que certaines productions, notamment celles des produits 7 et 3, poseront des défis en raison de l'utilisation prolongée de la foreuse horizontale.

Il est également facile de remarquer les produits qui exigent un temps de production important. Pour le produit 7, par exemple, qui nécessite plus de 1,2 heures répartie sur trois machines, c'est un argument supplémentaire suggérant que ce produit, en plus de son prix de vente relativement bas, ne sera pas privilégié et, par conséquent, sera probablement produit en quantités limitées. À l'inverse, en plus des constatations précédentes, on voit que le produit 5 est loin d'être celui qui nécessite le plus de temps machine, il sera donc sûrement produit en grande quantité (autant que l'on peut vendre et stocker).



La disponibilité des machines semble bien alignée sur les besoins réels de production. Nous avons quatre broyeuses à disposition, il est clair que c'est un type de machine fortement sollicité. À l'inverse, nous avons une seule raboteuse et cette machine est nettement moins sollicitée, le nombre de machine disponible semble donc en adéquation avec les besoins réels de production. Le graphique suivant renforce cet argument en mettant en évidence le temps d'utilisation des machines, normalisé par la quantité de machines disponibles.

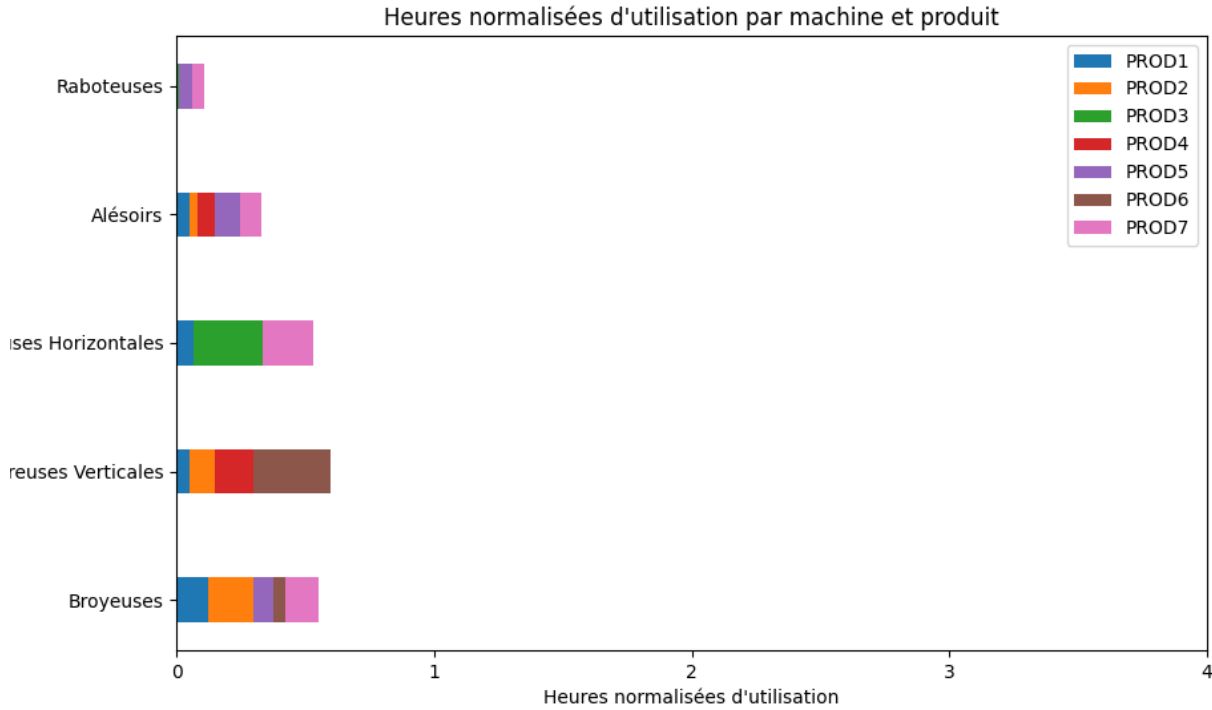


Figure 3.6.4: Temps d'utilisation par machine, avec répartition par produit

On voit bien que les machines les plus utilisées sont les foreuses verticales alors que la raboteuse, elle, est très peu utilisée et ne sert que sur 3 produits parmi les 7.

4 Résultats et interprétation

4.1 Résultats

En utilisant le solveur cplex présent dans AMPL on obtient les résultats suivants :

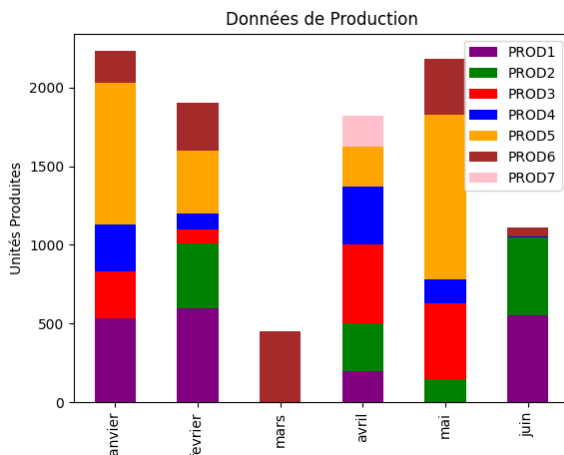


Figure 4.1.1: Quantités produites

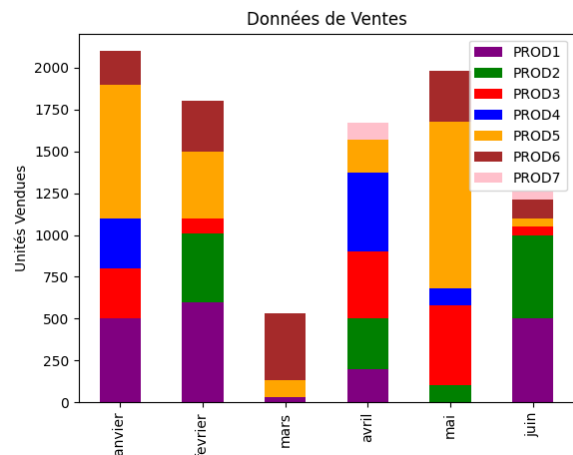


Figure 4.1.2: Ventes réalisées

L'analyse de la production confirme effectivement nos intuitions basées sur les statistiques descriptives. Nous

observons une production importante du produit 5, qui est le plus cher. À l'inverse, le produit 7, étant moins coûteux, est produit et vendu en moindre quantité, indiquant qu'il est considéré comme moins intéressant en raison de son faible prix et de sa forte sollicitation des machines.

La cohérence entre la production et les ventes est également évidente, comme le montrent nos graphiques qui affichent des tendances très similaires puisque l'on peut au maximum stocker une quantité de 100 par produit et par mois. Cette concordance suggère que la majorité des produits fabriqués sont ensuite vendus, indiquant une gestion efficace de la production et des stocks. En mars et en juin, nous notons une baisse de la production, explicable par des maintenances de machines. En mars, l'unique alésoir disponible est en maintenance limitant la production possible aux produits 3 ou 6. Toutefois, l'impossibilité de vendre le produit 3 durant ce mois conduit à une production exclusive du produit 6, et à la vente de quelques autres produits en utilisant les stocks. En juin, la maintenance de l'unique raboteuse et d'une foreuse verticale restreint la production aux produits 1, 2, 4, et 6. Le choix de produire principalement les produits 1 et 2 est dicté par leur rentabilité et ce couple de produit réduit les embouteillages aux machines. Ces observations suggèrent que le schéma de maintenance actuel n'est pas optimal. Un exemple supplémentaire de cette situation est observé en juin, où il existe une forte possibilité de vendre notre produit le plus cher, le produit 5. Cependant, en raison des opérations de maintenance planifiées, nous nous trouvons dans l'incapacité de produire ce dernier en grande quantité. L'optimisation du schéma de maintenance sera étudiée dans la suite.

On regarde maintenant le stockage des produits.

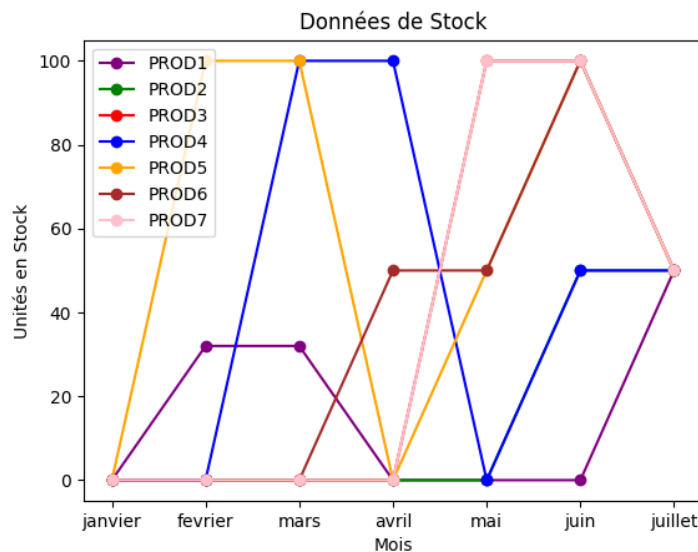


Figure 4.1.3: Évolution du stockage

On rappelle que les stocks sont calculés au début du mois.

On peut effectivement constater la convergence des stocks vers 50 unités de chaque produit à la fin du mois de juin. Nous observons que certains produits atteignent leur quantité maximale de stockage (100 unités).



La capacité de stockage s'avère être un paramètre important à étudier dans le cadre de notre post-optimisation, pour vérifier s'il serait intéressant pour certains produits d'entrer en production en plus grande quantité certains mois où les contraintes ne la limite pas trop et de pouvoir stocker cette quantité afin d'augmenter les ventes plus tard. En effet les ventes ne sont pas toujours à la limite maximale, indiquant que l'on pourrait produire en plus grande quantité.

Ce schéma de production donne un profit total de **79 884 €**.

4.2 Variables d'écart

L'analyse du temps disponible restant sur chaque type de machine par mois offre une perspective cruciale sur la gestion efficace des ressources et la planification des opérations.

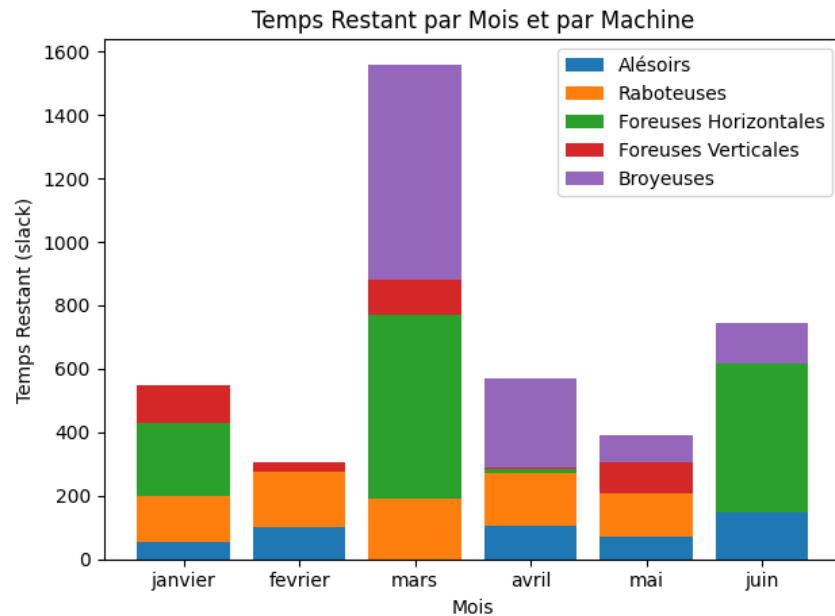


Figure 4.2.1: Disponibilité des machines

On représente le temps restant disponible pour chaque type de machine (on ne prend pas en compte les machines qui sont en maintenance car elles ne sont pas considérées comme indisponibles). Le graphique suggère que le planning de maintenance actuel n'est pas optimal. Par exemple, la maintenance de deux foreuses verticales en février alors que la seule restante est utilisée à sa capacité maximale, contraste fortement avec leur forte disponibilité en mars. Une répartition plus équilibrée de la maintenance des foreuses verticales sur ces deux mois aurait probablement été plus judicieuse.

De même, ce graphique offre une perspective sur l'impact potentiel de l'achat de nouvelles machines. Les broyeuses, par exemple, sont intensément sollicitées en janvier et février, mais leur utilisation diminue par la suite. Cela pourrait indiquer qu'une machine supplémentaire serait bénéfique pour répondre à la forte demande en début d'année, tout en évitant les coûts inutiles durant les périodes de moindre utilisation. En revanche, la raboteuse, bien qu'elle ne soit pas en maintenance (sauf en juin), n'est pas utilisée à sa pleine capacité tous les mois, ce qui suggère que l'ajout d'une nouvelle raboteuse pourrait ne pas augmenter significativement la production.

5 Évolution possible de divers paramètres

Dans la continuité de notre analyse, nous allons aborder la phase de post-optimisation, où nous allons faire de petites variations, par exemple sur les capacités de stockage (toujours avec un coût de stockage égal à 50 centimes par unité) dans le but de proposer des solutions visant à augmenter le profit.

5.1 Augmentation de la capacité de stockage

Étant donné que la capacité de stockage maximale a été atteinte, on peut s'attendre à une amélioration du profit en cas d'augmentation de cette capacité.

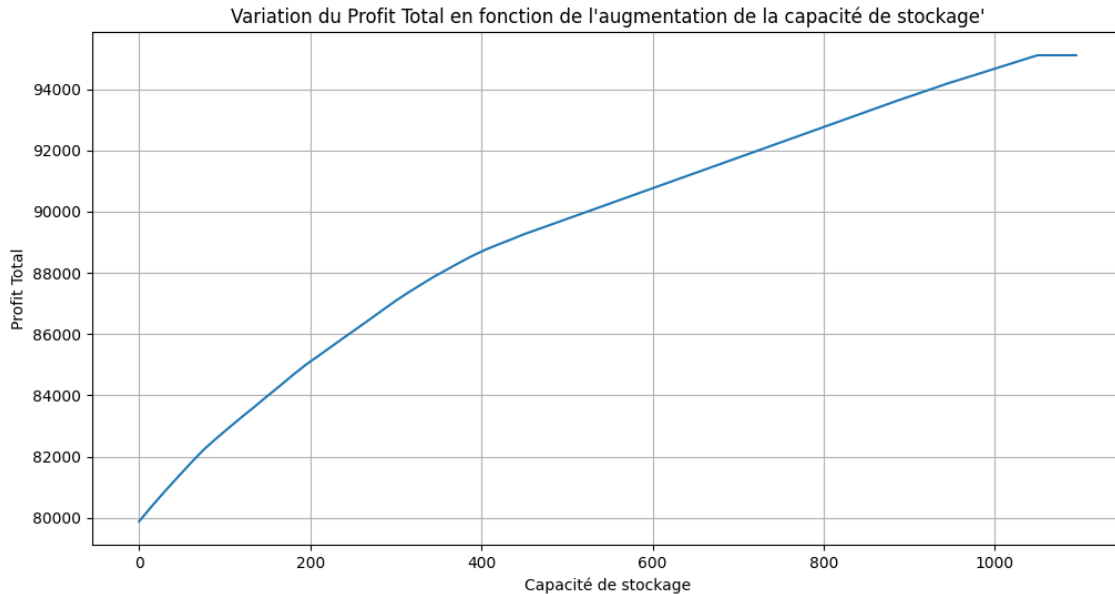


Figure 5.1.1: Évolution du profit en fonction de la capacité de stockage

On observe effectivement une augmentation du profit, qui semble se dérouler en quatre phases distinctes. Cette hausse du profit s'explique par le fait qu'une plus grande capacité de stockage permet de compenser les périodes où les maintenances limitent la production de certains produits, en vendant davantage durant ces mois. Nous allons étudier en détail 3 augmentations précises de la capacité de stockage pour comprendre comment évolue la logistique.

5.1.1 Augmentation de 100 unités de stockage par produit

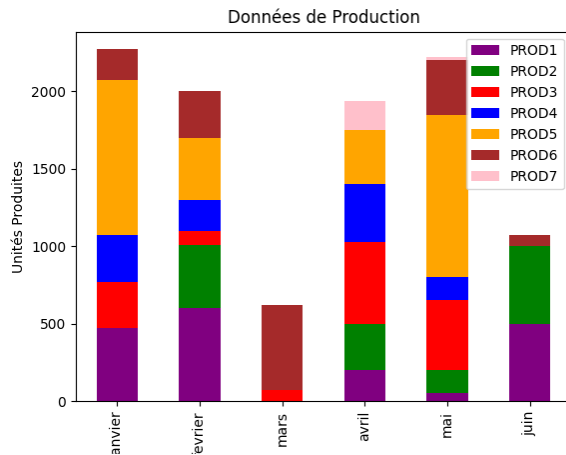


Figure 5.1.2: Quantités produites, stockage 200

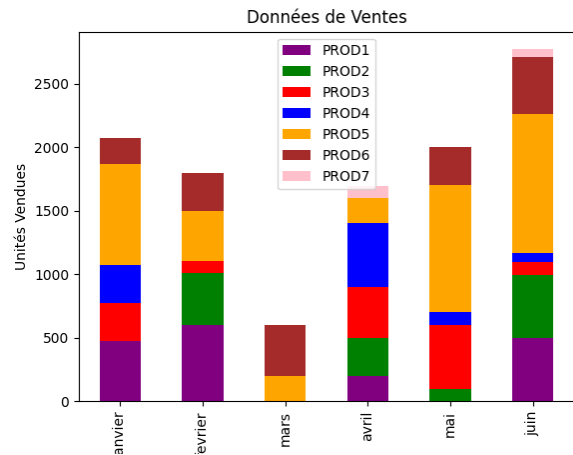


Figure 5.1.3: Ventes réalisées, stockage 200

On voit que ce changement n'a pas énormément modifié la logique derrière les quantités de production, c'est toujours au mois de mars et de juin qu'elles sont les plus faibles et la répartition des produits est globalement la même.

Cependant on peut noter qu'en juin les ventes ont légèrement augmenté, ce qui est logique puisque l'on avait stocké une plus grande quantité mais que l'on doit toujours avoir un stock de 50 en juin. On peut d'ailleurs le remarquer sur le graphique suivant :

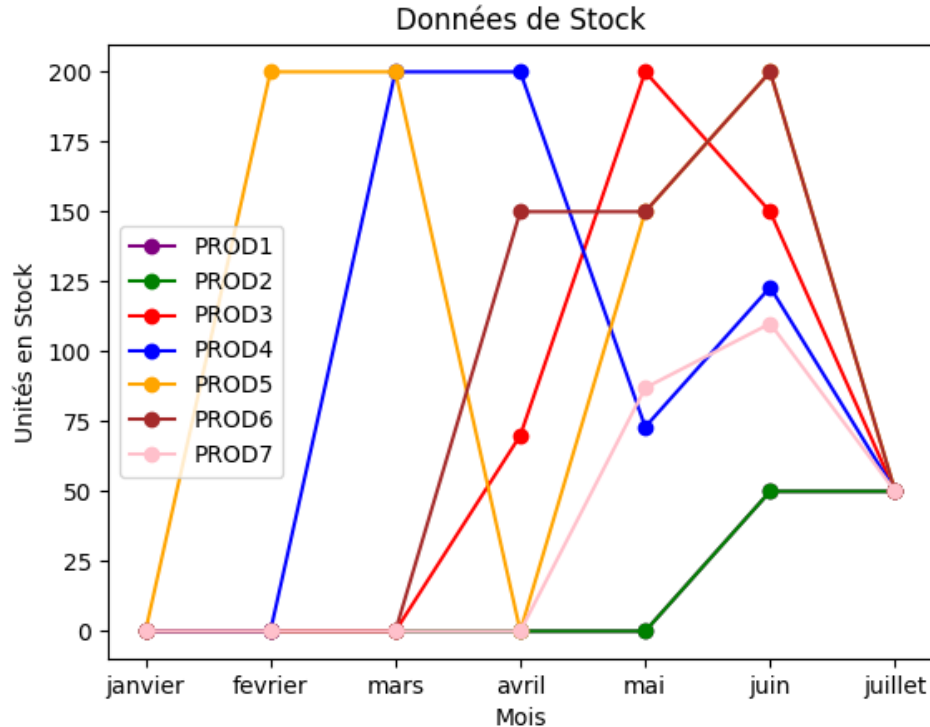


Figure 5.1.4: Évolution du stockage avec une capacité de 200 par produit

On voit bien que les produits ont des logiques de gestion différentes, certains sont plus intéressants à stocker à des moments précis. Par exemple ce qui a été stocké du produit 4 est vendu en avril, c'est logique puisque qu'en

février et mars on ne pouvait pas vendre ce produit donc on l'a stocké.

Cette petite augmentation de la capacité de stockage a permis de légèrement booster les ventes, notamment en juin ce qui a engendré une hausse du profit.

Ce schéma de production donne un profit total de **82 823.5 €**.

5.1.2 Augmentation de 500 unités de stockage par produit

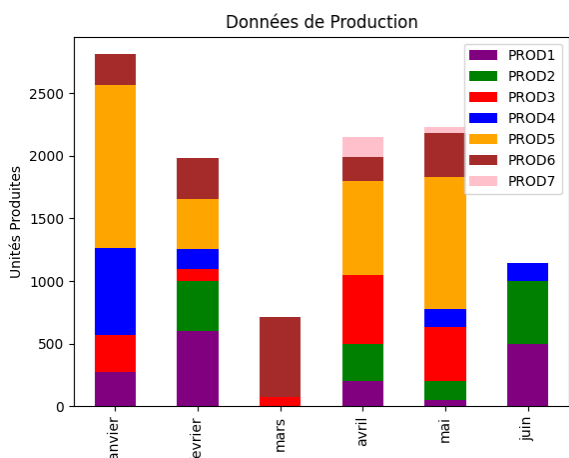


Figure 5.1.5: Quantités produites, stockage 600

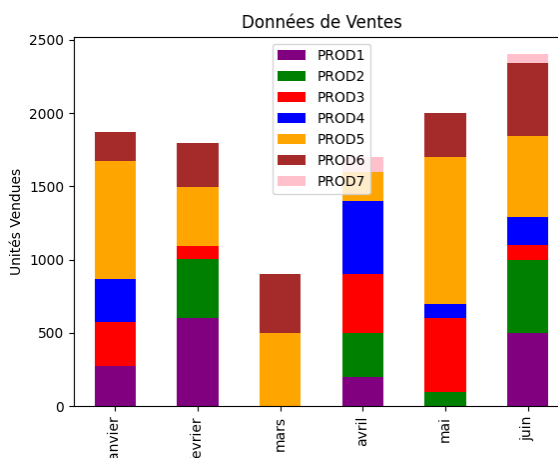


Figure 5.1.6: Ventes réalisées, stockage 600

Comme précédemment la logique de production n'a pas fondamentalement changé, on produit simplement plus de chaque produit, en revanche on voit que les ventes se sont encore décuplées en juin. En effet comme le montre le graphique ci-dessous, on avait beaucoup de stock des produits 6 et 5 qui ont tous été vendu en juin.

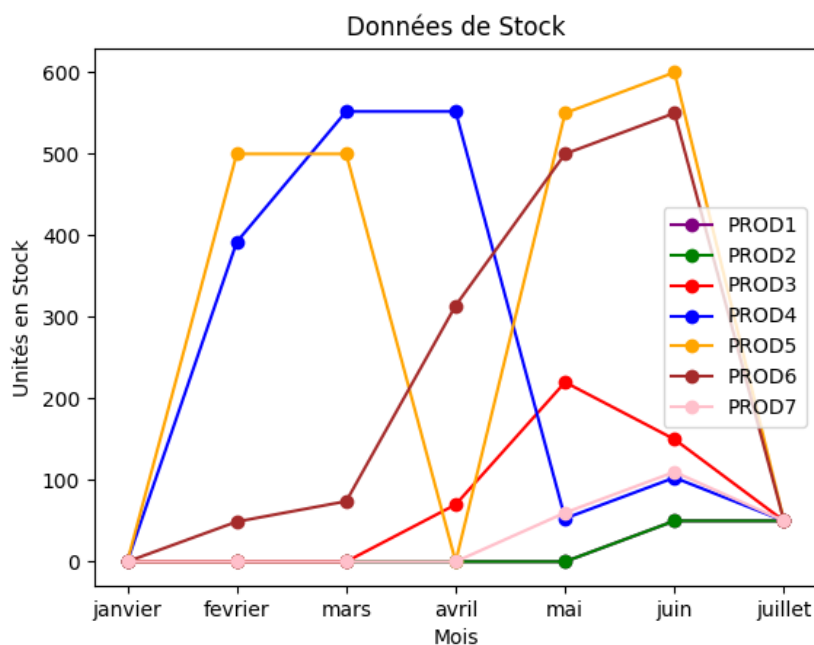


Figure 5.1.7: Évolution du stockage avec une capacité de 600 par produit

Ce schéma de production donne un profit total de **89 762.5 €**.

5.1.3 Augmentation de 1100 unités de stockage par produit

Nous avons donc un stockage possible de 1200 unités. Voyons les productions et les ventes.

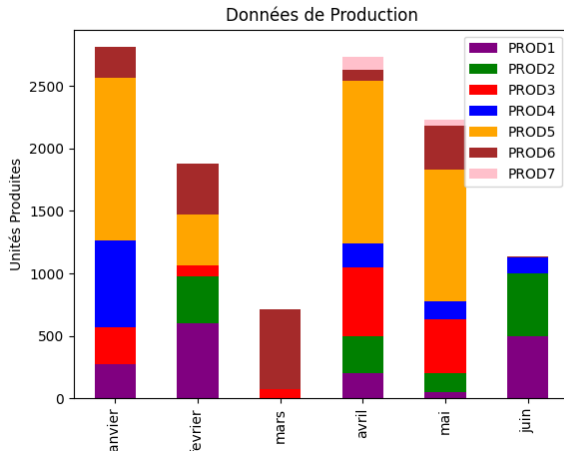


Figure 5.1.8: Quantités produites, stockage 1200

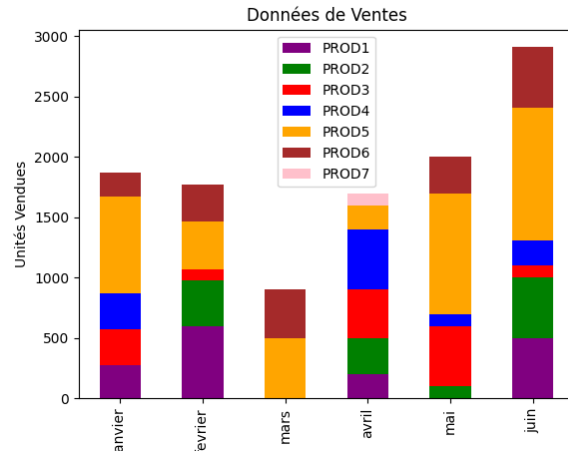


Figure 5.1.9: Ventes réalisées, stockage 1200

Avec un stockage précédemment limité, nos graphiques montraient presque une parfaite superposition, indiquant que la quasi-totalité de la production était vendue dans le même mois. Désormais, il est observable que la production dépasse ce qui peut être vendu dans un mois, donc le stockage est utilisé pour compenser les périodes où les maintenances sont contraignantes. Par exemple, en mars, nous vendons le produit 5 qui a été produit et stocké en janvier. De même, en juin, nous vendons des produits qui ont été produits les mois précédents. On constate qu'un produit, le produit 5, est favorisé, car c'est celui que l'on produit le plus. On peut facilement l'expliquer car c'est celui qui se vend le plus cher et qui est moins contraignant. D'ailleurs on peut remarquer que cela a permis de le produire en très grande quantité de janvier à mai mais qu'on peut se permettre de ne pas le produire en juin pour favoriser d'autres produits mais vendre tous les stocks pour en tirer beaucoup de profit.

Voyons l'évolution du stockage :

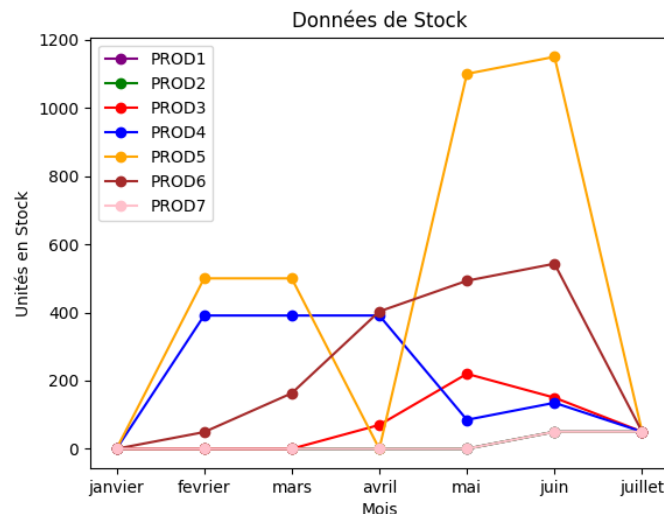


Figure 5.1.10: Evolution du stockage avec une capacité de 1200 par produit

On remarque que le stockage est beaucoup plus utilisé que précédemment, on constate que pour tous les produits sauf le 5 nous n'avons pas besoin d'une si grande capacité de stockage, une capacité d'environ 500 suffirait mais pour le produit 5 on atteint la capacité de stockage maximale.

Ce schéma de production donne un profit total de **95 106 €**.



Même s'il n'y a que pour le produit 5 qu'il est utile d'augmenter à ce point le stockage, les bénéfices engendrés sont tout sauf négligeables. Cependant comme le suggérait notre graphique d'évolution du profit en fonction de la capacité de stockage, la courbe est concave donc augmenter de plus en plus le stockage n'apporte plus autant de bénéfices jusqu'à atteindre un plafond.



Cette analyse repose sur le fait que le coût de stockage ne varie pas, dans la réalité, on se doute bien que si la situation initiale impose une quantité de 100 par produit, c'est probablement à cause de contrainte de place dans le lieu de stockage. Augmenter à ce point la capacité de stockage engendrerait des coûts supplémentaires en infrastructures (nouvel entrepôt ou agrandissement). Il serait probablement intéressant d'augmenter légèrement la capacité (là où la courbe est la plus pentue), car les bénéfices engendrés seraient sûrement supérieurs aux coûts logistiques.

5.2 Achat d'une nouvelle machine

Bien que nous étudierons dans une section postérieure le cas de l'achat de nouvelles machines devant être mises en maintenance (voir section 7), on peut faire une étude préliminaire dans cette partie de post-optimisation. Le cas de l'achat d'une nouvelle machine toutes choses égales par ailleurs (pas besoin d'être en maintenance et aucun coût supplémentaire engendré). Les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

Machine (+1)	Profit (€)	Δ
Broyeuse	82 497	+2 613
Foreuse verticale	83 299	+3 415
Foreuse horizontale	81 026	+1 142
Alésoir	90 707.5	+10 823.5
Raboteuse	91 538	+11 654
Alésoir + Raboteuse	102 357.5	+22 473.5

Table 4: Évolution du profit en fonction de l'achat de nouvelles machines

Ce tableau, tout en ne prenant pas en compte les maintenances des nouvelles machines (comme abordé dans la section 7 pour l'optimisation du schéma de maintenance), offre des insights significatifs sur l'utilisation actuelle des équipements. Selon la partie 4.1 concernant les variables d'écart, il est noté que chaque type de machine connaît un mois de sous-utilisation. En alignant les périodes de maintenance des nouvelles machines avec ces mois de moindre utilisation, l'impact sur la production serait nul. Cette méthode garantit que les machines ne sont pas hors service pendant leurs périodes de forte demande, optimisant ainsi le rendement global et la continuité de la production.

L'analyse des investissements dans de nouvelles machines, présentée dans le tableau ci-dessus, révèle des augmentations significatives en pourcentage du profit. Par exemple, l'ajout d'une broyeuse entraîne une augmentation du profit de 2 613 €, ce qui représente une hausse d'environ 3,16 %. L'investissement dans des foreuses verticales se traduit par une augmentation encore plus significative du profit, à hauteur de 3 415 €, soit une hausse d'environ 4,10 %.

L'acquisition d'alésoirs se distingue par son impact notable sur le profit, avec une hausse d'environ 11,93 %. De manière similaire, l'achat d'une raboteuse conduit à une importante augmentation du profit, avec une hausse d'environ 12,74 %.

L'option la plus rentable semble être l'achat combiné d'un alésoir et d'une raboteuse, qui augmente le profit de 22 473,5 €, soit une hausse d'environ 21,99 %. Ces augmentations en pourcentage soulignent l'efficacité des investissements en équipement pour augmenter le profit. Auparavant, avec un seul alésoir et une seule raboteuse, la production était limitée pendant leurs périodes de maintenance. Maintenant, avec l'ajout de nouvelles machines

de ce type, nous sommes en mesure de maintenir une production continue même pendant la maintenance de l'une des machines. Cela signifie que les mois traditionnellement marqués par une baisse de production à cause de la maintenance ne représentent plus un frein. Par conséquent, la capacité accrue à produire sans interruption conduit à une augmentation considérable du profit.



Les 2 cas intéressants semblent être une nouvelle raboteuse et un nouvel alésoir, les autres apportent peu de profit supplémentaire, dès lors, en prenant en compte le coût éventuel d'achat des machines, ces options ne seraient plus vraiment rentables (surtout à court terme comme dans notre situation).

Étudions en détail le cas où l'on achète une nouvelle raboteuse et un nouvel alésoir :

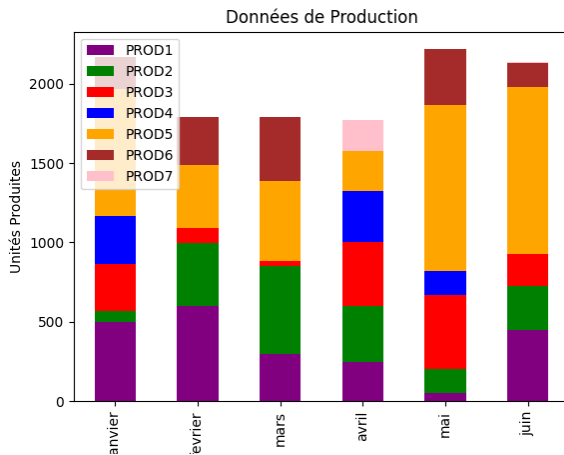


Figure 5.2.1: Quantités produites, alésoir + raboteuse

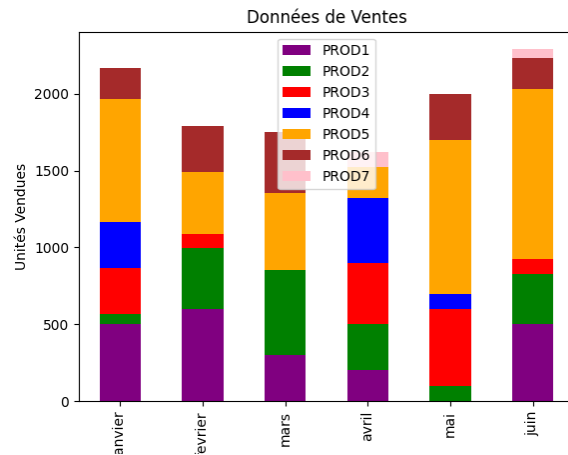


Figure 5.2.2: Ventes réalisées, alésoir + raboteuse

On aurait pu s'attendre à une forte hausse de la production de produit 7 étant donné que c'est celui qui nécessite le plus de temps sur l'alésoir et la raboteuse. Cependant on voit que la production n'a pas augmenté pour ce dernier. Notamment à cause de son très faible prix de vente, il est finalement plus intéressant d'augmenter la production d'autres produits plus intéressants à la vente. Cela a donc permis de désengorger l'utilisation de ces machines.

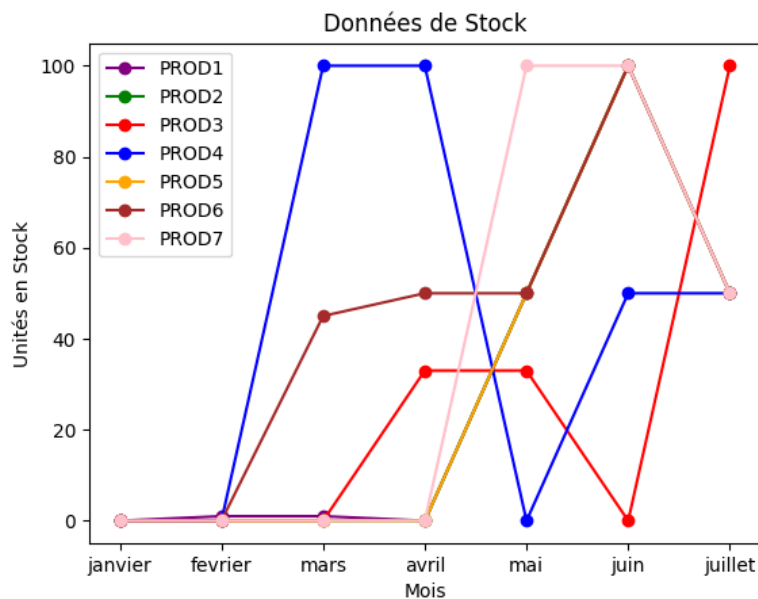


Figure 5.2.3: Évolution du stockage, alésoir + raboteuse

De même, le stockage du produit 7 n'a pas changé, contrairement au produit 1 et 5.

Ce schéma de production donne un profit total de **102 357.5 €**.



Rappelons que ce cas particulier est sous hypothèse que cette nouvelle machine ayant été achetée très récemment, n'a pas besoin d'être mise en maintenance. Nous étudierons ce cas dans la section 7, afin de voir si la maintenance a un impact significatif.

6 Optimisation du planning de maintenance

Dans cette partie, notre objectif est de déterminer le meilleur plan de maintenance. Nous cherchons un planning qui réduira au minimum l'impact sur la production et les ventes, tout en permettant d'augmenter les profits. Comme nous l'avons constaté dans les parties précédentes, sans une optimisation de ce planning, il arrive que certains mois nous produisions uniquement un seul produit en quantités limitées. Par conséquent, notre démarche consiste à résoudre ce problème pour améliorer la situation.

6.1 Implémentation en langage AMPL des modifications

Nous allons expliquer comment implémenter en langage AMPL les modifications nécessaires pour traduire ce nouveau problème. On utilise le problème initial auquel on apporte quelques modifications.

6.1.1 Les nouveaux ensembles

On définit 5 nouveaux ensembles :

- BROYEUSES contenant les quatre broyeuses numérotées de 1 à 4.
- FOREUSES_VERTICALES contenant les deux foreuses verticales numérotées 1 et 2.
- FOREUSES_HORIZONTALES contenant les trois foreuses horizontales numérotées de 1 à 3.
- MACHINES_SANS_BROYEUSES_FOREUSES contenant l'ensemble des machines sans les broyeuses ni foreuses
- ALL_MACHINES_DETAIL il s'agit de la réunion des quatre ensembles précédents, il contient les machines numérotées, ainsi que l'alésoir et la raboteuse.

Nous décidons de mettre de côté les broyeuses, les foreuses verticales et horizontales. Il peut y en avoir plusieurs du même type en maintenance le même mois, ce qui facilite la gestion des contraintes qui vont suivre. Nous les définissons séparément.

```
1 set BROYEUSES ;
2 set MACHINES_SANS_BROYEUSES_FOREUSES ;
3 set ALL_MACHINES_DETAIL ;
4 set FOREUSES_VERTICALES ;
5 set FOREUSES_HORIZONTALES ;
```

6.1.2 Modification des paramètres

On supprime le paramètre maintenance (aussi dans le fichier de données) qui sera maintenant une variable binaire.

6.1.3 Ajout d'une nouvelle variable

On commence par définir une nouvelle variable bivalente "maintenance", indexée par ALL_MACHINES_DETAIL et MOIS, pour déterminer si une machine est en maintenance (elle prend la valeur 1) ou non (elle prend la valeur 0 sinon).

```
1 var maintenance {ALL_MACHINES_DETAIL, MOIS} binary;
```

6.1.4 Les nouvelles contraintes

On commence par modifier la contrainte sur le temps disponible pour nos machines. On crée quatre contraintes qui ont le même rôle mais on distingue les types de machines. Sinon la contrainte est la même que dans le problème initiale.

```
1 subject to ContrainteTempsTotalBroyeuses {m in MOIS}:
2     sum {p in PRODUITS} tempsUtilisation[p, "broyeuses"] * production[m, p] <=
      nbHeuresParMois * (nombre_machine["broyeuses"] - sum {ma in BROYEUSES}
      maintenance[ma, m]);
3
4 subject to ContrainteTempsTotalForeuses_verticales {m in MOIS}:
5     sum {p in PRODUITS} tempsUtilisation[p, "foreuses_verticales"] * production[m, p] <=
      nbHeuresParMois * (nombre_machine["foreuses_verticales"] - sum {ma in
      FOREUSES_VERTICALES} maintenance[ma, m]);
6
7 subject to ContrainteTempsTotalForeuses_horizontales {m in MOIS}:
8     sum {p in PRODUITS} tempsUtilisation[p, "foreuses_horizontales"] * production[m, p]
      <= nbHeuresParMois * (nombre_machine["foreuses_horizontales"] - sum {ma in
      FOREUSES_HORIZONTALES} maintenance[ma, m]);
9
10 subject to ContrainteTempsTotalAutreMachines {ma in MACHINES_SANS_BROYEUSES_FOREUSES, m
      in MOIS}:
11     sum {p in PRODUITS} tempsUtilisation[p, ma] * production[m, p] <= nbHeuresParMois *
      (nombre_machine[ma] - maintenance[ma, m]);
```

On rajoute les contraintes pour les maintenances. Chaque machine doit être arrêtée pour maintenance un mois sur les six à l'exception des broyeuses : seulement deux sur quatre doivent être arrêtées un mois sur les six.

```
1 subject to ContrainteMaintenanceBroyeuses :
2     sum {ma in BROYEUSES} sum {m in MOIS} maintenance[ma, m] >= 2;
3
4 subject to ContrainteMaintenanceForeusesVerticales :
5     sum {ma in FOREUSES_VERTICALES} sum {m in MOIS} maintenance[ma, m] = nombre_machine[
      "foreuses_verticales"];
6
7 subject to ContrainteMaintenanceForeusesHorizontales :
8     sum {ma in FOREUSES_HORIZONTALES} sum {m in MOIS} maintenance[ma, m] = nombre_machine
      ["foreuses_horizontales"];
9
10 subject to ContrainteMaintenanceAutresMachines {ma in MACHINES_SANS_BROYEUSES_FOREUSES}:
11     sum {m in MOIS} maintenance[ma, m] = nombre_machine[ma];
```

Puisque nous avons distingué les broyeuses et les foreuses, on rajoute une contrainte pour que ce ne soit pas toujours la même qui soit choisie pour être en maintenance (en effet si une machine a été en maintenance dans les six mois on considère qu'elle n'a pas besoin de l'être à nouveau et on privilégie une autre machine du même type).

```
1 subject to MaintenanceMachineUnique {ma in ALL_MACHINES_DETAIL } : #pour eviter que ce
      soit a chaque fois la meme broyeuse/foreuse en maintenance
2     sum {m in MOIS} maintenance [ma,m]<=1;
```

6.2 Résultats et interprétations

En utilisant le solveur cplex présent dans AMPL on obtient les résultats suivants :

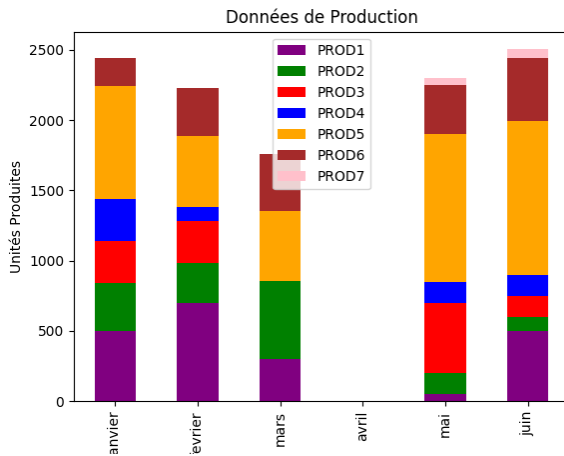


Figure 6.2.1: Quantités produites, planning optimisé

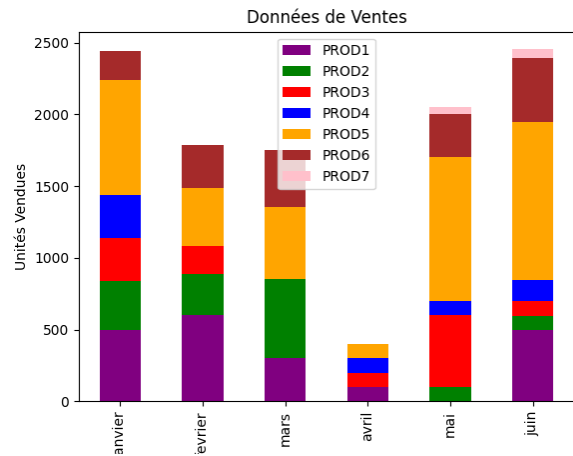


Figure 6.2.2: Ventes réalisées, planning optimisé

On voit qu'en ayant le choix sur le planning de maintenance les résultats sont sensiblement différents, les quantités produites en mars et en juin sont bien plus élevées que dans la situation initiale et surtout le changement majeur réside au mois d'avril où la production est à l'arrêt. Et les ventes sont faibles (on vend ce que l'on a un peu en stock). Sinon il s'agit toujours du produit 5 qui est produit et vendu en plus grande quantité, d'ailleurs c'est justement en avril qu'il peut être vendu en moindre quantité, ce qui peut expliquer pourquoi il est bénéfique de mettre les machines en maintenance en avril.

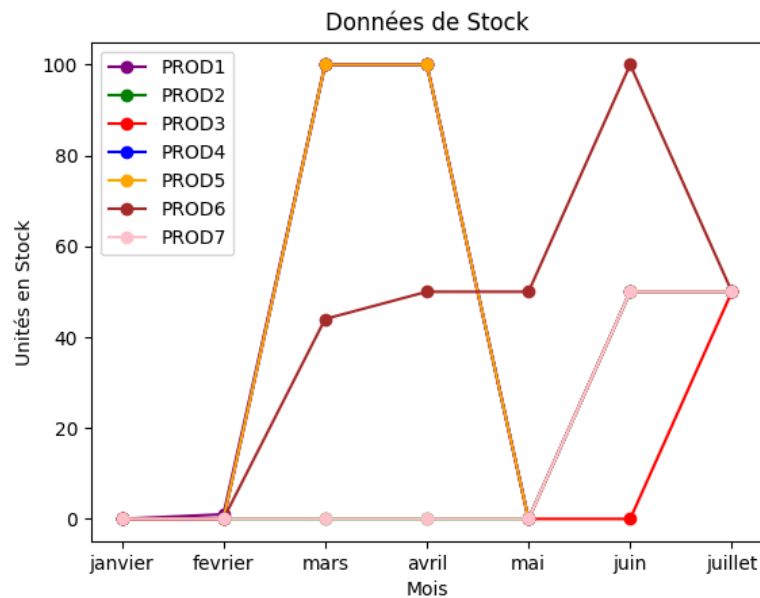


Figure 6.2.3: Evolution du stockage, planning optimisé

Les résultats s'expliquent en regardant le planning de maintenance obtenu :

Machine	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin
Alésoirs						
Alésoirs	0	0	0	1	0	0
Broyeuses						
Broyeuse 1	0	0	0	0	0	0
Broyeuse 2	0	0	0	0	1	0
Broyeuse 3	0	0	0	0	0	0
Broyeuse 4	0	0	0	1	0	0
Foreuses Horizontales						
Foreuse Horizontale 1	0	1	0	0	0	0
Foreuse Horizontale 2	0	0	0	0	0	1
Foreuse Horizontale 3	1	0	0	0	0	0
Foreuses Verticales						
Foreuse Verticale 1	0	0	0	1	0	0
Foreuse Verticale 2	0	0	0	1	0	0
Raboteuses						
Raboteuses	0	0	0	1	0	0

Table 5: Maintenance des machines par mois, planning optimisé

En effet on voit bien qu'en avril la plupart des machines sont en maintenance ce qui explique l'arrêt de la production. C'est le cas de l'alésoir et de la raboteuse, des 2 foreuses verticales et de l'une des broyeuses sur les 2 devant être mises en maintenance. Nous cherchons la raison pour laquelle la plupart des machines sont en maintenance en avril. Cela peut s'expliquer par le fait que les quantités qu'il est possible de vendre en avril sont relativement faibles pour tous les produits. De plus comme les produits nécessitent de passer sur plusieurs machines, il est plus intéressant de toutes les mettre en maintenance en même temps que de bloquer la production sur plusieurs mois en mettant les machines en maintenance une par une (nous avons vu que la mise en maintenance de l'alésoir bloque la quasi totalité de la production, donc autant mettre d'autre machines en maintenance au même moment).

Nous avons constaté que la production est complètement arrêtée en avril, indiquant qu'on peut mettre toutes les machines en maintenance ce mois-ci sans impacter davantage la production, car elle est déjà de 0. Cependant, certaines machines telles que les foreuses horizontales et une broyeuse ne le sont pas. Cela suggère qu'elles peuvent être en maintenance durant un autre mois sans affecter la production, sinon elles auraient été mises en maintenance en avril. Il y a donc plusieurs schéma de maintenance possible. Nous verrons un autre schéma de maintenance possible dans la remarque qui suit.

Ce schéma de production donne un profit total de **98 162.5 €**
 Soit une hausse de 18 278.5 € par rapport à la situation où le planning nous est imposé.

6.2.1 Remarque

On étudie également le cas où l'on retire la contrainte suivante :

```

1 subject to MaintenanceMachineUnique {ma in ALL_MACHINES_DETAIL } :
2     sum {m in MOIS} maintenance [ma,m] <= 1;
```

En effet dans notre situation cette contrainte a une dimension esthétique mais n'est pas réellement contraignante, car elle garantit simplement que, dans le cas où nous avons plusieurs machines du même type, ce seront des machines différentes qui seront mises en maintenance sur toute la période. Cependant, étant donné que toutes les machines d'une même catégorie sont identiques d'un point de vue production, cela ne devrait normalement pas affecter notre solution.



Il est important de noter que cela n'affecte pas la valeur de la solution optimale, mais modifie simplement le schéma de maintenance. Toutefois, il est équivalent dans le sens où il conduit à la même valeur optimale.

Machine	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin
Alésoirs						
Alésoirs	0	0	0	1	0	0
Broyeuses						
Broyeuse 1	0	0	0	1	0	0
Broyeuse 2	0	0	0	0	0	0
Broyeuse 3	0	0	0	1	0	0
Broyeuse 4	0	0	0	0	0	0
Foreuses Horizontales						
Foreuse Horizontale 1	0	0	1	0	0	1
Foreuse Horizontale 2	0	0	1	0	0	0
Foreuse Horizontale 3	0	0	0	0	0	0
Foreuses Verticales						
Foreuse Verticale 1	0	0	0	1	0	0
Foreuse Verticale 2	0	0	0	1	0	0
Raboteuses						
Raboteuses	0	0	0	1	0	0

Table 6: Maintenance des machines par mois, planning optimisé possible

En retirant la contrainte on se retrouve avec la Foreuse Horizontale 1 en maintenance sur 2 mois mais puisque que les trois foreuses sont équivalentes il suffirait de le corriger "à la main" et mettre en maintenance la foreuse horizontale n°3.

On retrouve le même principe de mettre beaucoup de machines en maintenance en avril, ce qui engendre un arrêt total de la production ce mois-ci. Les productions et les ventes sont identiques à quelques unités près.

Ce phénomène s'explique par le fait que nous travaillons avec des valeurs entières, ce qui signifie que le solveur utilise des heuristiques dans le processus du Branch and Bound. Il en résulte que des solutions équivalentes en termes de solution optimale peuvent être obtenues en ajoutant une contrainte "esthétique" qui n'affecte pas la valeur de la solution optimale, mais qui peut modifier le schéma de maintenance car il en existe plusieurs.

6.3 Variables d'écart

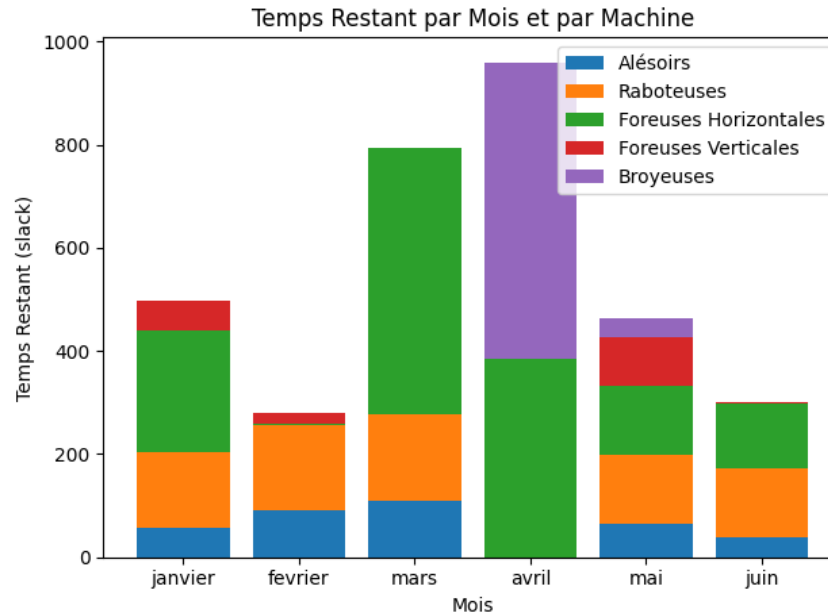


Figure 6.3.1: Disponibilité des machines, planning optimisé

On étudie le temps disponible restant sur chaque type de machine par mois (on ne prend pas en compte les machines qui sont en maintenance car elles ne sont pas considérées comme indisponibles). Cela nous aide à anticiper quels changements pourraient avoir un impact. Par exemple les foreuses horizontales sont encore disponibles tous les mois donc en ajouter une risque de ne pas augmenter les bénéfices. A l'inverse, les broyeuses sont pleinement utilisées sauf en avril, donc en acheter une nouvelle pourrait être utile pour augmenter notre productions les mois où elles sont saturées. Pour les autres machines, l'effet est plus difficile à anticiper.

7 Achat éventuel de nouvelles machines

Pour étudier l'impact de l'achat d'une nouvelle machine, il suffit de modifier le code précédent en ajoutant cette nouvelle machine à l'ensemble correspondant et en modifiant le nombre de machines de ce type. Dans le cas de l'alésoir et de la raboteuse, nous avons créé un nouvel ensemble pour chacun et mis à jour le fichier de données en indiquant le nouveau nombre de machines dans chaque ensemble. Par exemple :

```
1 set ALESOIRS := alesoir1 alesoir2;
2
3 set RABOTEUSES := raboteuses;
```

Ainsi que les contraintes :

```
1 subject to ContrainteMaintenanceAlesoirs :
2     sum {ma in ALESOIRS} sum {m in MOIS} maintenance[ma, m] = 2;
3
4 subject to ContrainteMaintenanceRaboteuses :
5     sum {ma in RABOTEUSES} sum {m in MOIS} maintenance[ma, m] = 1;
6
7 subject to ContrainteTempsTotalAlesoirs{m in MOIS}:
8     sum {p in PRODUITS} tempsUtilisation[p, "alesoirs"] * production[m, p] <=
9         nbHeuresParMois * (nombre_machine["alesoirs"] - sum {ma in ALESOIRS} maintenance
10            [ma, m]);
11
12 subject to ContrainteTempsTotalRaboteuses{m in MOIS}:
13     sum {p in PRODUITS} tempsUtilisation[p, "raboteuses"] * production[m, p] <=
14         nbHeuresParMois * (nombre_machine["raboteuses"] - sum {ma in RABOTEUSES}
15            maintenance[ma, m]);
```

Lors de l'achat de nouvelles machines, nous ne tiendrons pas compte du coût de l'achat lui-même, mais nous considérerons que chaque machine, y compris les nouvelles, doit être mise en maintenance une fois tous les six mois. Notre comparaison du profit se fera par rapport à celui discuté dans la partie 6.2 (problème avec optimisation du schéma de distribution).

7.1 Achat d'une Foreuse Horizontale

En achetant une nouvelle Foreuse Horizontale, nous ne nous attendons pas à une grande augmentation, car nous avons observé dans les plannings de maintenance précédents qu'elles peuvent être mises en maintenance à différents mois sans impacter la production. On résout le problème avec ces nouvelles données, nous obtenons le schéma de maintenance suivant :

Machine	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin
Alésoir						
Alésoir	0	0	0	1	0	0
Broyeuses						
Broyeuse 1	0	0	0	0	0	0
Broyeuse 2	0	0	0	0	1	0
Broyeuse 3	0	0	0	0	0	0
Broyeuse 4	0	0	0	1	0	0
Foreuses Horizontales						
Foreuse Horizontale 1	0	0	0	0	1	0
Foreuse Horizontale 2	0	0	0	0	0	1
Foreuse Horizontale 3	0	0	0	1	0	0
Foreuse Horizontale 4	0	0	0	0	0	1
Foreuses Verticales						
Foreuse Verticale 1	0	0	0	1	0	0
Foreuse Verticale 2	0	0	0	1	0	0
Raboteuse						
Raboteuse	0	0	0	1	0	0

Table 7: Maintenance des machines par mois, achat d'une foreuse horizontale

On constate que l'on conserve la stratégie précédente de mettre beaucoup de machine en maintenance au mois d'avril. Seul le planning pour les foreuses horizontales a changé, on en met plus en maintenance en début de période.

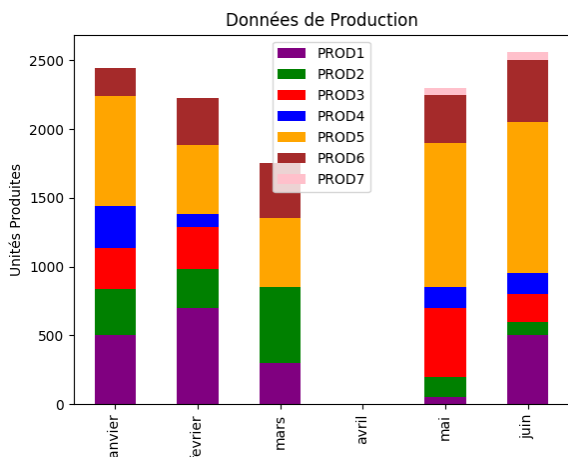


Figure 7.1.1: Quantités produites, foreuse horizontale

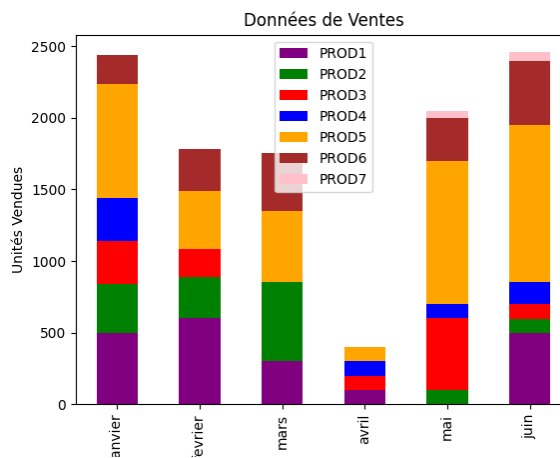


Figure 7.1.2: Ventes réalisées, foreuse horizontale

On retrouve une logistique identique à celle de la partie 6.2.

L'achat de cette nouvelle machine n'entraîne pas d'augmentation importante du profit, il passe à **98 168.5€** soit une hausse de seulement 6 €.



Comme nous l'avions anticipé dans la section précédente, il est inutile d'investir dans une quatrième foreuse horizontale. Au contraire, on perdrait de l'argent en considérant le coût d'achat de cette foreuse. Cela signifie que l'utilisation des foreuses horizontales est déjà optimale au vue des produits que nous fabriquons.

7.2 Achat d'un Alésoir

Si nous achetons un deuxième alésoir, nous avons bon espoir d'augmenter considérablement le profit, selon l'étude en 5.2.

Machine	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin
Alésoirs						
Alésoir 1	1	0	0	0	0	0
Alésoir 2	0	1	0	0	0	0
Broyeuses						
Broyeuse 1	0	0	0	0	0	0
Broyeuse 2	0	0	0	0	1	0
Broyeuse 3	0	0	0	0	0	0
Broyeuse 4	0	0	0	1	0	0
Foreuses Horizontales						
Foreuse Horizontale 1	0	0	0	1	0	0
Foreuse Horizontale 2	0	0	0	0	0	1
Foreuse Horizontale 3	1	0	0	0	0	0
Foreuses Verticales						
Foreuse Verticale 1	0	0	0	1	0	0
Foreuse Verticale 2	0	0	0	0	1	0
Raboteuse						
Raboteuse	0	0	0	1	0	0

Table 8: Maintenance des machines par mois, achat d'un alésoir

En effet, avec l'achat d'un nouvel alésoir, nous avons de nouvelles perspectives d'utilisation et nous optons pour un planning de maintenance plus équilibré. Cela permet de maintenir une légère production au mois d'avril et conduit à une augmentation significative du profit.

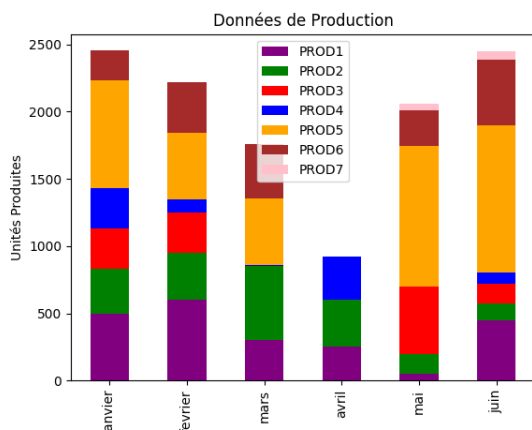


Figure 7.2.1: Quantités produites, alésoir

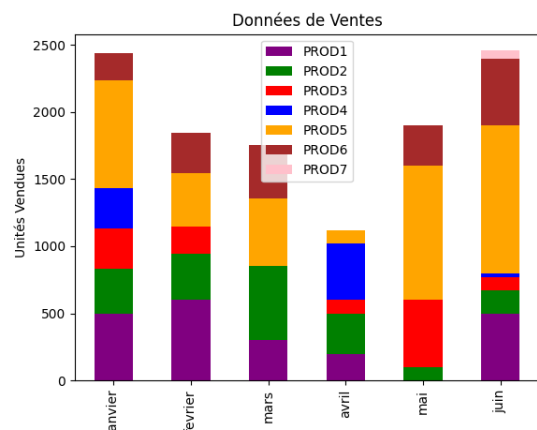


Figure 7.2.2: Ventes réalisées, alésoir

On voit bien que ce sont des produits qui nécessitent également de passer sur l'alésoir qui sont le plus impacté par ce changement (notamment les produits 1,2 et 4), en effet le produit 5 qui est privilégié comme vu précédemment est également celui qui nécessite le plus de temps sur les alésoirs, donc l'achat d'un nouveau permet désormais de faire passer d'autres produits en même temps et donc de les produire en plus grande quantité.

Ce schéma de production donne un profit total de **102 103.5€**. Soit une hausse de **3 941 €**. Cet investissement pourrait donc rapidement être rentabilisé, même sur une si courte période.

7.3 Achat d'une Raboteuse

De la même manière que pour l'alésoir, on s'attend à une forte augmentation du profit. Dans notre étude préliminaire en 5.2, nous avons observé une importante augmentation du profit avec l'achat d'une nouvelle raboteuse. On s'attend à la même chose ici.

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin
Alésoirs						
Alésoirs	0	0	0	1	0	0
Broyeuses						
Broyeuse 1	0	0	0	0	0	0
Broyeuse 2	0	0	0	0	1	0
Broyeuse 3	0	0	0	0	0	0
Broyeuse 4	0	0	0	1	0	0
Foreuses Horizontales						
Foreuse Horizontale 1	0	1	0	0	0	0
Foreuse Horizontale 2	0	0	0	0	0	1
Foreuse Horizontale 3	1	0	0	0	0	0
Foreuses Verticales						
Foreuse Verticale 1	0	0	0	1	0	0
Foreuse Verticale 2	0	0	0	1	0	0
Raboteuses						
Raboteuse 1	1	0	0	0	0	0
Raboteuse 2	0	1	0	0	0	0

Table 9: Maintenance des machines par mois, achat d'une raboteuse

On constate que l'on choisit de ne plus mettre en maintenance les raboteuses en avril, mais en janvier et février. Cela permet d'assurer une petite production en avril. Le fait d'acheter une nouvelle raboteuse permet d'en mettre une en maintenance tout en continuant les productions des produits qui nécessitent l'utilisation de cette machine.

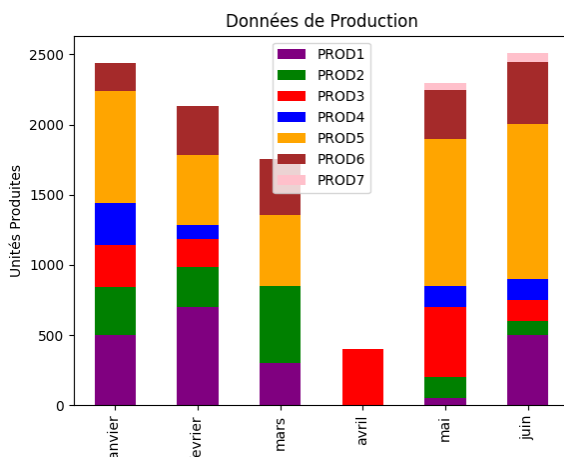


Figure 7.3.1: Quantités produites, raboteuse

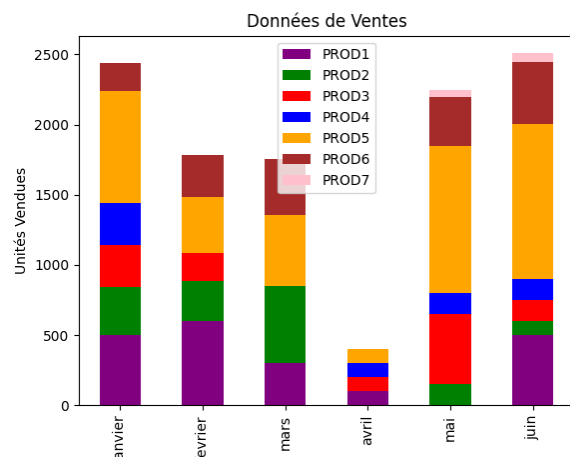


Figure 7.3.2: Ventes réalisées, raboteuse

C'est notamment le cas du produit 3 qui est l'un des produits nécessitant la raboteuse, qui peut désormais être produit et vendu en avril. Ainsi, on augmente notre profit de manière importante.

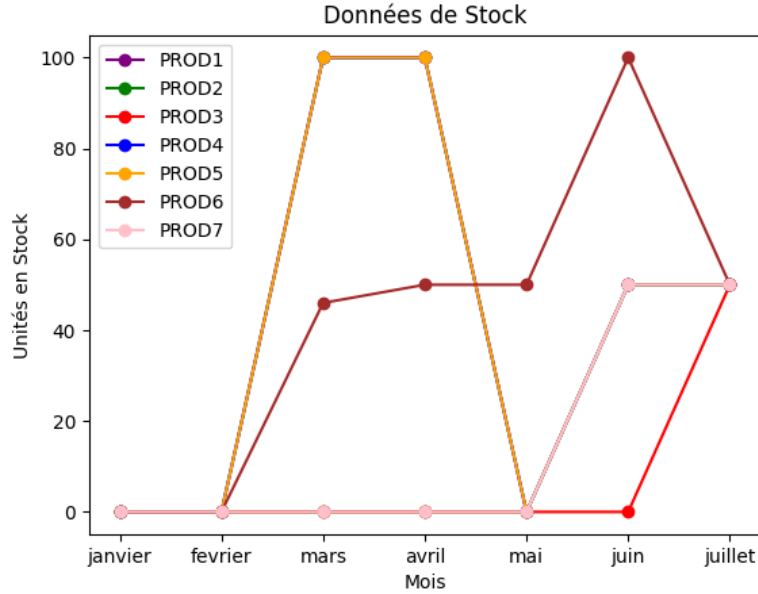


Figure 7.3.3: Évolution du stockage, raboteuse

Du point de vu des stocks, les principaux changements concernent également le produit 3, avant on le produisait en janvier et février pour en stocker une quantité maximale en mars et avril, désormais on vend tout ce que l'on produit en janvier et février, on n'en produit plus en mars et en avril et donc n'en stocke plus.

Ce schéma de production donne un profit total de **100 671€**. Soit une hausse de **2 508.5 €**

7.4 Achat d'une Foreuse Verticale

En achetant une troisième foreuse verticale nous avons obtenu ce schéma de maintenance :

Machine	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin
Alésoir						
Alésoir	0	0	0	1	0	0
Broyeuses						
Broyeuse 1	0	0	0	0	0	0
Broyeuse 2	0	0	0	0	1	0
Broyeuse 3	0	0	0	0	0	0
Broyeuse 4	0	0	0	1	0	0
Foreuses Horizontales						
Foreuse Horizontale 1	0	1	0	0	0	1
Foreuse Horizontale 2	0	0	0	0	0	0
Foreuse Horizontale 3	1	0	0	0	0	0
Foreuses Verticales						
Foreuse Verticale 1	0	0	0	0	1	0
Foreuse Verticale 2	0	1	0	0	0	0
Foreuse Verticale 3	1	0	0	0	0	0
Raboteuse						
Raboteuse	0	0	0	1	0	0

Table 10: Maintenance des machines par mois, achat d'une foreuse verticale

Désormais les foreuses verticales ne sont plus en maintenance en avril. Cela veut dire que ces machines n'étaient pas les plus contraignantes sur nos produits et que l'on peut répartir ces dernières selon nos besoins.

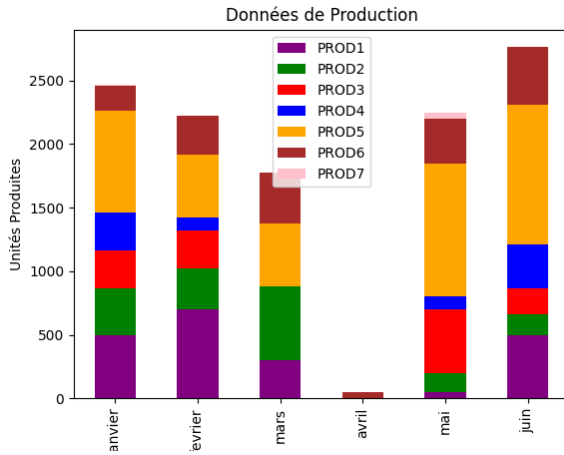


Figure 7.4.1: Quantités produites, foreuse verticale

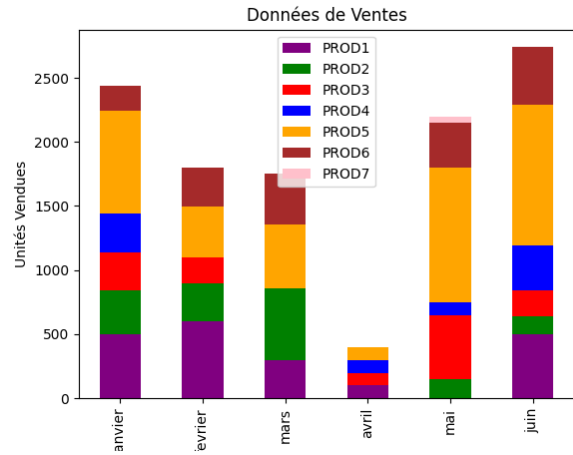


Figure 7.4.2: Ventes réalisées, foreuse verticale

L'impact de cette troisième foreuse verticale est significatif durant le mois de juin, où elle permet une production plus importante. Cependant, les autres mois, il y a peu de différence. Mais cela permet néanmoins d'augmenter légèrement notre profit.

Ce schéma de production donne un profit total de **99 011€**. Soit une légère hausse de **848.5 €**.

7.5 Achat d'une Broyeuse

Initialement, seules 2 des 4 broyeuses devaient être mises en maintenance. On remarque que la valeur optimale ne change pas si l'on choisit de mettre (ou pas) en maintenance notre nouvelle broyeuse, en effet en la mettant en maintenance, cette dernière se déroule en mai, là où les 4 broyeuses étaient déjà suffisantes. Par conséquent, nous décidons de la mettre en maintenance pour coller à la réalité et prévenir des pannes éventuelles, évidemment si la maintenance avait un coût le choix pourrait être différent.

Machine	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin
Alésoir						
Alésoir	0	0	0	1	0	0
Broyeuses						
Broyeuse 1	0	0	0	1	0	0
Broyeuse 2	0	0	0	0	1	0
Broyeuse 3	0	0	0	1	0	0
Broyeuse 4	0	0	0	0	0	0
Broyeuse 5	0	0	0	0	0	0
Foreuses Horizontales						
Foreuse Horizontale 1	0	0	0	0	0	1
Foreuse Horizontale 2	0	0	1	0	0	0
Foreuse Horizontale 3	1	0	0	0	0	0
Foreuses Verticales						
Foreuse Verticale 1	0	0	0	1	0	0
Foreuse Verticale 2	0	0	0	1	0	0
Raboteuse						
Raboteuse	0	0	0	1	0	0

Table 11: Maintenance des machines par mois, achat d'une broyeuse

On constate la même stratégie déjà expliquée précédemment, qui consiste à mettre beaucoup de machines en maintenance en avril.

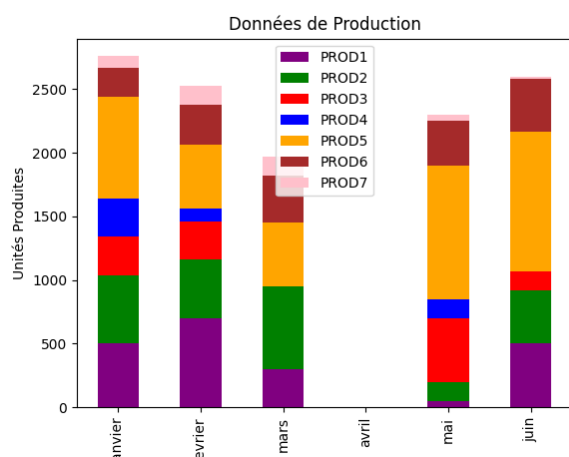


Figure 7.5.1: Quantités produites, broyeuse

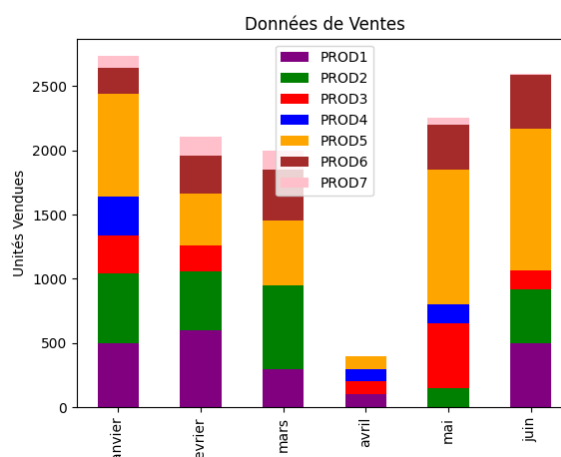


Figure 7.5.2: Ventes réalisées, broyeuse

L'achat d'une cinquième broyeuse permet de produire en plus grande quantité, notamment en janvier, février et mars. On peut ainsi produire des articles qui n'étaient initialement pas prioritaires étant donné leur plus faible prix de vente, comme le produit 7. Cette production supplémentaire entraîne une hausse importante du profit.

Ce schéma de production donne un profit total de **102 671€**. Soit une hausse de **4 508.5€**



On rappelle que l'on a pas pris en compte le coût d'achat des machines, ce qui veut dire que les augmentations de profit sont à nuancer. En effet dépendant du coût d'achat, certaines situations peuvent ne pas être si intéressantes. On peut considérer que l'achat d'une broyeuse ou d'un alésoir sont à privilégier et semblent être les investissements les plus rentables (notamment à court terme comme sur notre étude.

8 Conclusion

Notre étude se concentrait sur une usine fonctionnant 8h par jour pendant 24 jours sur un mois donné, possédant plusieurs machines permettant la production de divers produits. Chaque produit devant passer un certain temps sur les machines et ayant un prix de vente qui lui est propre. De plus les machines devaient être arrêtées et mises en maintenance à certains moments et les produits ne pouvaient être vendus qu'en quantité limitée, dépendant du mois. Enfin, les stocks de notre usine étaient limités à 100 unités par produit et par mois à un coût fixe de 50 centimes d'euros par unité.

Afin de résoudre les problèmes opérationnels de cette usine, notre approche a consisté à optimiser la production en fonction des machines disponibles en utilisant le logiciel AMPL. Dans une première phase, nous avons cherché à maximiser les profits totaux en prenant en compte les coûts associés au stockage, ce qui a abouti à un plan directement applicable pour un profit total de **79 884 €**.

Dans notre quête d'amélioration de la performance de l'usine, nous avons examiné diverses variations envisageables pour cette dernière. Par exemple, nous avons évalué l'impact de l'augmentation de la capacité de stockage, en mettant de côté les coûts d'investissement. Cela nous a montré qu'augmenter le stockage pouvait s'avérer être une stratégie payante mais que cela devenait de moins en moins intéressant à mesure de l'augmentation. Cela serait d'autant plus vrai que les coûts d'investissements eux seraient de plus en plus élevés. Nous avons également envisagé la possibilité d'acheter de nouvelles machines (sans contrainte de maintenance), afin d'avoir une première idée des gains possibles. Cela nous a montré que plusieurs options étaient envisageables.

Souhaitant toujours optimiser la production, nous avons proposé un nouveau plan de maintenance. Ce dernier pouvant s'adapter en cas de changements, par exemple si les prix de certains produits venaient à varier ou que l'on pouvait vendre en plus grande quantité, alors il pourrait devenir bénéfique de modifier le planning de maintenance. Ce nouveau planning aboutissait à un profit total de **98 162.5 €**, soit une hausse de **18 278.5 €** par rapport à la situation où le planning nous était imposé.

Enfin nous avons envisagé la possibilité de réaliser un investissement en machines. L'étude préliminaire nous ayant déjà donné une idée des investissements potentiellement bénéfiques. Nous avons conclu que l'achat d'une broyeuse était le plus rentable, ensuite venait l'achat d'un alésoir ou possiblement d'une raboteuse. Cependant, en prenant en compte le coût d'achat des machines, cet ordre pourrait changer voire même ces choix pourraient ne plus être rentables (sur une si courte période). Les 2 options qui ne sont pas intéressantes en l'état actuel de la production sont l'achat d'une foreuse verticale et surtout d'une foreuse horizontale, qui n'apporte aucun bénéfice supplémentaire sans même prendre en compte son coût.

Finalement, notre usine dispose de stratégies diverses et variées afin de maximiser ses gains, mais l'option qui semble la plus pertinente à court terme est l'optimisation du planning de maintenance tel que proposé, couplé à l'achat d'une nouvelle broyeuse ou éventuellement d'un alésoir selon leur coût et l'augmentation du stockage si les lieux le permettent pour un coût raisonnable.

9 Annexes

Listes des figures

3.6.1 Répartition des prix de ventes par produits	5
3.6.2 Limites de production mensuelles par produit	6
3.6.3 Temps d'utilisation par machine pour confectionner un produit	7
3.6.4 Temps d'utilisation par machine, avec répartition par produit	8
4.1.1 Quantités produites	8
4.1.2 Ventes réalisées	8
4.1.3 Évolution du stockage	9
4.2.1 Disponibilité des machines	10
5.1.1 Évolution du profit en fonction de la capacité de stockage	11
5.1.2 Quantités produites, stockage 200	12
5.1.3 Ventes réalisées, stockage 200	12
5.1.4 Évolution du stockage avec une capacité de 200 par produit	12
5.1.5 Quantités produites, stockage 600	13
5.1.6 Ventes réalisées, stockage 600	13
5.1.7 Évolution du stockage avec une capacité de 600 par produit	13
5.1.8 Quantités produites, stockage 1200	14
5.1.9 Ventes réalisées, stockage 1200	14
5.1.10 Évolution du stockage avec une capacité de 1200 par produit	14
5.2.1 Quantités produites, alésoir + raboteuse	16
5.2.2 Ventes réalisées, alésoir + raboteuse	16
5.2.3 Évolution du stockage, alésoir + raboteuse	16
6.2.1 Quantités produites, planning optimisé	19
6.2.2 Ventes réalisées, planning optimisé	19
6.2.3 Evolution du stockage, planning optimisé	19
6.3.1 Disponibilité des machines, planning optimisé	21
7.1.1 Quantités produites, foreuse horizontale	23
7.1.2 Ventes réalisées, foreuse horizontale	23
7.2.1 Quantités produites, alésoir	24
7.2.2 Ventes réalisées, alésoir	24
7.3.1 Quantités produites, raboteuse	25
7.3.2 Ventes réalisées, raboteuse	25
7.3.3 Évolution du stockage, raboteuse	26
7.4.1 Quantités produites, foreuse verticale	27
7.4.2 Ventes réalisées, foreuse verticale	27
7.5.1 Quantités produites, broyeuse	28
7.5.2 Ventes réalisées, broyeuse	28

Listes des tables

1	Tableau de production	2
2	Planning de Maintenance	2
3	Limitations des Ventes par Mois	2
4	Évolution du profit en fonction de l'achat de nouvelles machines	15
5	Maintenance des machines par mois, planning optimisé	20
6	Maintenance des machines par mois, planning optimisé possible	21
7	Maintenance des machines par mois, achat d'une foreuse horizontale	23
8	Maintenance des machines par mois, achat d'un alésoir	24
9	Maintenance des machines par mois, achat d'une raboteuse	25
10	Maintenance des machines par mois, achat d'une foreuse verticale	26
11	Maintenance des machines par mois, achat d'une broyeuse	27

Code des parties 4

Le fichier .mod

```
1 # Ensembles
2 set PRODUITS;          # Ensemble des produits
3 set MACHINES;          # Ensemble des machines
4 set MOISp ordered;     # Ensemble de tous les mois, y compris un mois supplémentaire
5 set MOIS := MOISp diff {last(MOISp)} ordered; # Ensemble de mois sans le mois
    supplémentaire
6
7 # Parametres
8 param nombre_machine {MACHINES};          # Nombre de chaque machine
9 param prixVente {PRODUITS};               # Prix de vente par produit
10 param tempsUtilisation {PRODUITS, MACHINES}; # Temps d'utilisation des machines par
    produit
11 param maintenance {MACHINES, MOIS};       # Maintenance des machines par mois
12 param venteMax {PRODUITS, MOIS};          # Ventes maximales par produit et par mois
13
14 param stockMax;                          # Stock maximum
15 param coutStockage;                      # Cout de stockage par produit
16 param stockFinal;                        # Stock final souhaite
17 param nbHeuresParMois;                   # Nombre d'heures de travail par mois
18 param delta;                             # Parametre supplémentaire pour la gestion du
    stock
19
20 # Variables de decision
21 var production {MOIS, PRODUITS} >= 0 integer; # Quantite produite par mois pour chaque
    produit
22 var stock {MOISp, PRODUITS} >= 0 integer;      # Stock de chaque produit (incluant le
    mois supplémentaire)
23 var vente {MOIS, PRODUITS} >= 0 integer;       # Ventes reelles par mois pour chaque
    produit
24
25 # Fonction objectif
26 maximize ProfitTotal:
27     sum {m in MOIS, p in PRODUITS} (prixVente[p] * vente[m,p])
28     - sum {m in MOIS, p in PRODUITS} (coutStockage * stock[m,p]);
29
30 # Contraintes
31
32 # Contrainte sur le temps total d'utilisation des machines
33 subject to ContrainteTempsTotalMachine {ma in MACHINES, m in MOIS}:
34     sum {p in PRODUITS} tempsUtilisation[p, ma] * production[m, p] <= nbHeuresParMois *
        (nombre_machine[ma] - maintenance[ma, m]);
35
36 # Contraintes de gestion de stock
37 subject to StockInitial {p in PRODUITS}:
38     stock[first(MOISp),p] = 0; # Initialisation du stock en janvier
39
40 subject to EquilibreStock {m in MOIS, p in PRODUITS}:
41     stock[next(m, MOISp), p] = stock[m, p] + production[m, p] - vente[m, p];
42
43 subject to StockFinal {p in PRODUITS}:
44     stock[last(MOISp),p] >= stockFinal; # Stock minimum requis en juin
45
46 subject to StockMax {m in MOISp, p in PRODUITS}:
47     stock[m,p] <= stockMax + delta; # Limite maximale du stock
48
49 # Contrainte sur les ventes maximales
50 subject to VenteMaxContrainte {m in MOIS, p in PRODUITS}:
51     vente[m,p] <= venteMax[p,m];
```

```

52
53 # Contrainte pour assurer la couverture des ventes des mois suivants
54 subject to CouvertureVenteMoisSuivants {m in MOIS, p in PRODUITS}:
55     vente[m, p] <= production[m, p] + (if m != first(MOISp) then stock[prev(m, MOISp), p
        ] else 0);

```

Le fichier .data

```

1
2 # Definition des ensembles de produits, de machines et de mois (y compris un mois
    supplementaire)
3 set PRODUITS := PROD1 PROD2 PROD3 PROD4 PROD5 PROD6 PROD7;
4 set MACHINES := broyeuses foreuses_verticales foreuses_horizontales alesoirs raboteuses;
5 set MOISp := janvier fevrier mars avril mai juin juillet;
6
7 # Parametres des nombres de machines disponibles
8 param nombre_machine :=
9 broyeuses 4
10 foreuses_verticales 2
11 foreuses_horizontales 3
12 alesoirs 1
13 raboteuses 1;
14
15 # Parametre supplementaire pour la gestion du stock
16 param delta := 0;
17
18 # Prix de vente de chaque produit
19 param prixVente :=
20 PROD1 10
21 PROD2 6
22 PROD3 8
23 PROD4 4
24 PROD5 11
25 PROD6 9
26 PROD7 3;
27
28 # Temps d'utilisation de chaque produit sur chaque machine
29 param tempsUtilisation : broyeuses foreuses_verticales foreuses_horizontales alesoirs
    raboteuses :=
30 PROD1 0.5 0.1 0.2 0.05 0
31 PROD2 0.7 0.2 0 0.03 0
32 PROD3 0 0 0.8 0 0.01
33 PROD4 0 0.3 0 0.07 0
34 PROD5 0.3 0 0 0.1 0.05
35 PROD6 0.2 0.6 0 0 0
36 PROD7 0.5 0 0.6 0.08 0.05;
37
38 # Planification de la maintenance pour chaque machine et mois
39 param maintenance : janvier fevrier mars avril mai juin :=
40 broyeuses 1 0 0 0 1 0
41 foreuses_verticales 0 0 0 1 0 1
42 foreuses_horizontales 0 2 0 0 1 0
43 alesoirs 0 0 1 0 0 0
44 raboteuses 0 0 0 0 0 1;
45
46 # Limites de vente mensuelles pour chaque produit
47 param venteMax : janvier fevrier mars avril mai juin :=
48 PROD1 500 600 300 200 0 500
49 PROD2 1000 500 600 300 100 500
50 PROD3 300 200 0 400 500 100
51 PROD4 300 0 0 500 100 300
52 PROD5 800 400 500 200 1000 1100

```



```

53 PROD6 200 300 400 0 300 500
54 PROD7 100 150 100 100 0 60;
55
56 # Cout de stockage et stock final souhaite
57 param stockMax := 100;
58 param coutStockage := 0.5;
59 param stockFinal := 50;
60 param nbHeuresParMois := 192; # (8h*24j)

```

Code des parties 5

Pour ajuster la capacité de stockage dans le modèle de la partie 5, il est nécessaire de mettre à jour la valeur du paramètre delta dans le fichier de données. Cette modification permettra d'augmenter la capacité de stockage globale en fonction des besoins.

Code des parties 6

le fichier.mod

```

1 # Declaration des ensembles
2 set PRODUITS; # Ensemble des produits
3 set MACHINES; # Ensemble des machines
4 set MOISp ordered; # Ensemble de tous les mois, y compris un mois supplémentaire
5 set MOIS := MOISp diff {last(MOISp)} ordered; # Ensemble des mois sans le dernier mois
   supplémentaire
6
7 # Sous-ensembles pour les machines
8 set BROYEUSES; # Ensemble des broyeuses
9 set MACHINES_SANS_BROYEUSES_FOREUSES; # Machines a l'exception des broyeuses et
   foreuses
10 set ALL_MACHINES_DETAIL; # Detail de toutes les machines
11 set FOREUSES_VERTICALES; # Ensemble des foreuses verticales
12 set FOREUSES_HORIZONTALES; # Ensemble des foreuses horizontales
13
14 # Parametres du modele
15 param nombre_machine {MACHINES}; # Nombre de chaque type de machine
16 param prixVente {PRODUITS}; # Prix de vente de chaque produit
17 param tempsUtilisation {PRODUITS, MACHINES}; # Temps d'utilisation pour chaque produit
   sur chaque machine
18 param venteMax {PRODUITS, MOIS}; # Limites des ventes mensuelles pour chaque produit
19 param stockMax; # Capacite maximale de stock
20 param coutStockage; # Cout du stockage par produit
21 param stockFinal; # Stock final souhaite pour chaque produit
22 param nbHeuresParMois; # Nombre d'heures de travail disponibles par mois
23
24 # Variables de decision
25 var maintenance {ALL_MACHINES_DETAIL, MOIS} binary; # Indique si une machine est en
   maintenance
26 var production {MOIS, PRODUITS} >= 0 integer; # Quantite de chaque produit a produire
   par mois
27 var stock {MOISp, PRODUITS} >= 0 integer; # Stock de chaque produit, incluant le mois
   supplémentaire
28 var vente {MOIS, PRODUITS} >= 0 integer; # Ventes reelles pour chaque produit et par
   mois
29
30 # Fonction objectif
31 maximize ProfitTotal: # Maximiser le profit total
32     sum {m in MOIS, p in PRODUITS} (prixVente[p] * vente[m,p])
33     - sum {m in MOIS, p in PRODUITS} (coutStockage * stock[m,p]);
34
35 # Contraintes de maintenance unique par machine

```

```

36 subject to MaintenaceMachineUnique {ma in ALL_MACHINES_DETAIL} :
37     sum {m in MOIS} maintenance[ma,m] <= 1;
38
39 #Contraintes de Temps d'utilisation des machines
40 subject to ContrainteTempsTotalBroyeuses {m in MOIS}:
41     sum {p in PRODUITS} tempsUtilisation[p, "broyeuses"] * production[m, p] <=
42         nbHeuresParMois * (nombre_machine["broyeuses"] - sum {ma in BROYEUSES}
43             maintenance[ma, m]);
44
45 subject to ContrainteTempsTotalForeuses_verticales {m in MOIS}:
46     sum {p in PRODUITS} tempsUtilisation[p, "foreuses_verticales"] * production[m, p] <=
47         nbHeuresParMois * (nombre_machine["foreuses_verticales"] - sum {ma in
48             FOREUSES_VERTICALES} maintenance[ma, m]);
49
50 subject to ContrainteTempsTotalForeuses_horizontales {m in MOIS}:
51     sum {p in PRODUITS} tempsUtilisation[p, "foreuses_horizontales"] * production[m, p]
52     <= nbHeuresParMois * (nombre_machine["foreuses_horizontales"] - sum {ma in
53         FOREUSES_HORIZONTALES} maintenance[ma, m]);
54
55 subject to ContrainteTempsTotalAutreMachines {ma in MACHINES_SANS_BROYEUSES_FOREUSES, m
56     in MOIS}:
57     sum {p in PRODUITS} tempsUtilisation[p, ma] * production[m, p] <= nbHeuresParMois *
58         (nombre_machine[ma] - maintenance[ma, m]);
59
60 # Contraintes de stockage
61 subject to StockInitial {p in PRODUITS}:
62     stock[first(MOISp),p] = 0; # Utilisation de first(MOISp) pour janvier
63
64 subject to EquilibreStock {m in MOIS, p in PRODUITS}:
65     stock[next(m, MOISp), p] = stock[m, p] + production[m, p] - vente[m, p];
66
67 subject to StockFinal {p in PRODUITS}:
68     stock[last(MOISp),p] >= stockFinal; # Utilisation de last(MOISp) pour juin
69
70 subject to StockMax {m in MOISp, p in PRODUITS}:
71     stock[m,p] <= stockMax;
72
73 # Contrainte pour assurer la couverture des ventes des mois suivants
74 subject to VenteMaxContrainte {m in MOIS, p in PRODUITS}:
75     vente[m,p] <= venteMax[p,m];
76
77 subject to CouvertureVenteMoisSuivants {m in MOIS, p in PRODUITS}:
78     vente[m, p] <= production[m, p] + (if m != first(MOISp) then stock[prev(m, MOISp), p
79         ] else 0);
80
81 # Nouvelles contraintes specifiques de maintenance pour chaque type de machine
82 subject to ContrainteMaintenanceBroyeuses :
83     sum {ma in BROYEUSES} sum {m in MOIS} maintenance[ma, m] >= 2;
84
85 subject to ContrainteMaintenanceForeusesVerticales :
86     sum {ma in FOREUSES_VERTICALES} sum {m in MOIS} maintenance[ma, m] = nombre_machine[
87         "foreuses_verticales"];
88
89 subject to ContrainteMaintenanceForeusesHorizontales :
90     sum {ma in FOREUSES_HORIZONTALES} sum {m in MOIS} maintenance[ma, m] =nombre_machine
91         ["foreuses_horizontales"];
92
93 subject to ContrainteMaintenanceAutresMachines {ma in MACHINES_SANS_BROYEUSES_FOREUSES}:
94     sum {m in MOIS} maintenance[ma, m] = nombre_machine[ma];

```

le fichier .data

```
1 # Ensembles pour les produits et machines
2 set PRODUITS := PROD1 PROD2 PROD3 PROD4 PROD5 PROD6 PROD7; # Ensemble des differents
   produits
3 set MACHINES := broyeuses foreuses_verticales foreuses_horizontales alesoirs raboteuses;
   # Machines disponibles
4 set MACHINES_SANS_BROYEUSES_FOREUSES := alesoirs raboteuses; # Machines excluant
   broyeuses et foreuses
5 set ALL_MACHINES_DETAIL := broyeuse1 broyeuse2 broyeuse3 broyeuse4 foreuse_verticale1
   foreuse_verticale2 foreuse_horizontale1 foreuse_horizontale2 foreuse_horizontale3
   alesoirs raboteuses; # Detail des machines
6 set BROYEUSES := broyeuse1 broyeuse2 broyeuse3 broyeuse4; # Les broyeuses specifiques
7 set MOISp := janvier fevrier mars avril mai juin juillet; # Ensemble de tous les mois,
   y compris un mois supplementaire
8 set FOREUSES_VERTICALES := foreuse_verticale1 foreuse_verticale2; # Foreuses verticales
   specifiques
9 set FOREUSES_HORIZONTALES := foreuse_horizontale1 foreuse_horizontale2
   foreuse_horizontale3; # Foreuses horizontales specifiques
10
11 # Nombre de machines disponibles
12 param nombre_machine :=
13 broyeuses          4
14 foreuses_verticales 2
15 foreuses_horizontales 3
16 alesoirs           1
17 raboteuses         1;
18
19 # Prix de vente pour chaque produit
20 param prixVente :=
21 PROD1 10
22 PROD2 6
23 PROD3 8
24 PROD4 4
25 PROD5 11
26 PROD6 9
27 PROD7 3;
28
29
30 # Temps d'utilisation necessaire sur chaque machine pour produire une unite de chaque
   produit
31 param tempsUtilisation : broyeuses foreuses_verticales foreuses_horizontales alesoirs
   raboteuses :=
32 PROD1 0.5 0.1 0.2 0.05 0
33 PROD2 0.7 0.2 0 0.03 0
34 PROD3 0 0 0.8 0 0.01
35 PROD4 0 0.3 0 0.07 0
36 PROD5 0.3 0 0 0.1 0.05
37 PROD6 0.2 0.6 0 0 0
38 PROD7 0.5 0 0.6 0.08 0.05;
39
40
41 #param maintenance : janvier fevrier mars avril mai juin :=
42 #broyeuses          1 0 0 0 0 1 0
43 #foreuses_verticales 0 0 0 1 0 1
44 #foreuses_horizontales 0 2 0 0 1 0
45 #alesoirs           0 0 0 1 0 0 0
46 #raboteuses         0 0 0 0 0 0 1;
47
48 # Limitations des ventes mensuelles pour chaque produit
49 param venteMax : janvier fevrier mars avril mai juin :=
```

```

50 PROD1          500      600      300      200      0      500
51 PROD2          1000     500      600      300     100     500
52 PROD3           300      200       0         400     500     100
53 PROD4           300       0         0         500     100     300
54 PROD5           800      400      500      200     1000    1100
55 PROD6           200      300      400       0         300     500
56 PROD7           100      150      100      100      0         60;
57
58
59 # Cout de stockage par produit et stock final souhaite pour chaque produit
60 param stockMax := 100; # Capacite maximale de stockage
61 param coutStockage := 0.5; # Cout de stockage par unite de produit
62 param stockFinal := 50; # Stock final souhaite
63 param nbHeuresParMois := 192; # Nombre total d'heures de travail disponibles par mois
    (8 heures par jour, 24 jours par mois)

```

Code des parties 7

On donne un exemple pour l'achat d'alésioir pour les autres il suffit de modifier de fichier de données

fichier .mod

```

1 # Definition des ensembles
2 set PRODUITS; # Ensemble des differents produits a produire
3 set MACHINES; # Ensemble des types de machines disponibles
4 set MOISp ordered; # Ensemble de tous les mois, incluant un mois supplementaire pour la
    gestion du stock
5 set MOIS := MOISp diff {last(MOISp)} ordered; # Ensemble des mois reels sans le mois
    supplementaire
6
7 # Definition des sous-ensembles pour les types specifiques de machines
8 set BROYEUSES; # Sous-ensemble pour les broyeuses
9 set ALESOIRS; # Sous-ensemble pour les alesoirs
10 set RABOTEUSES; # Sous-ensemble pour les raboteuses
11 set ALL_MACHINES_DETAIL; # Ensemble detaille de toutes les machines, utile pour la
    gestion de maintenance
12 set FOREUSES_VERTICALES; # Sous-ensemble pour les foreuses verticales
13 set FOREUSES_HORIZONTALES; # Sous-ensemble pour les foreuses horizontales
14
15 # Parametres generaux du modele
16 param nombre_machine {MACHINES}; # Nombre de machines disponibles par type
17 param prixVente {PRODUITS}; # Prix de vente unitaire pour chaque produit
18 param tempsUtilisation {PRODUITS, MACHINES}; # Temps d'utilisation necessaire sur
    chaque machine pour produire une unite de chaque produit
19 param venteMax {PRODUITS, MOIS}; # Ventes maximales autorisees pour chaque produit par
    mois
20
21 # Parametres relatifs au stockage
22 param stockMax; # Capacite maximale de stockage
23 param coutStockage; # Cout de stockage par unite de produit
24 param stockFinal; # Stock final souhaite pour chaque produit
25 param nbHeuresParMois; # Nombre total d'heures de travail disponibles par mois
26
27 # Variables de decision
28 var maintenance {ALL_MACHINES_DETAIL, MOIS} binary; # Indique si une machine est en
    maintenance (1 pour oui, 0 pour non)
29 var production {MOIS, PRODUITS} >= 0 integer; # Quantite produite pour chaque produit
    par mois
30 var stock {MOISp, PRODUITS} >= 0 integer; # Stock de chaque produit (inclut le mois
    supplementaire)
31 var vente {MOIS, PRODUITS} >= 0 integer; # Quantite vendue pour chaque produit par mois

```

```

32
33 # Objectif : Maximiser le profit total
34 maximize ProfitTotal:
35     sum {m in MOIS, p in PRODUITS} (prixVente[p] * vente[m,p])
36     - sum {m in MOIS, p in PRODUITS} (coutStockage * stock[m,p]);
37
38 # Contraintes de temps total d'utilisation pour chaque type de machine
39 subject to ContrainteTempsTotalBroyeuses {m in MOIS}:
40     sum {p in PRODUITS} tempsUtilisation[p, "broyeuses"] * production[m, p] <=
        nbHeuresParMois * (nombre_machine["broyeuses"] - sum {ma in BROYEUSES}
        maintenance[ma, m]);
41
42 subject to ContrainteTempsTotalForeuses_verticales {m in MOIS}:
43     sum {p in PRODUITS} tempsUtilisation[p, "foreuses_verticales"] * production[m, p] <=
        nbHeuresParMois * (nombre_machine["foreuses_verticales"] - sum {ma in
        FOREUSES_VERTICALES} maintenance[ma, m]);
44
45 subject to ContrainteTempsTotalForeuses_horizontales {m in MOIS}:
46     sum {p in PRODUITS} tempsUtilisation[p, "foreuses_horizontales"] * production[m, p]
        <= nbHeuresParMois * (nombre_machine["foreuses_horizontales"] - sum {ma in
        FOREUSES_HORIZONTALES} maintenance[ma, m]);
47
48 subject to ContrainteTempsTotalAlesoirs {m in MOIS}:
49     sum {p in PRODUITS} tempsUtilisation[p, "alesoirs"] * production[m, p] <=
        nbHeuresParMois * (nombre_machine["alesoirs"] - sum {ma in ALESOIRS} maintenance
        [ma, m]);
50
51 subject to ContrainteTempsTotalRaboteuses {m in MOIS}:
52     sum {p in PRODUITS} tempsUtilisation[p, "raboteuses"] * production[m, p] <=
        nbHeuresParMois * (nombre_machine["raboteuses"] - sum {ma in RABOTEUSES}
        maintenance[ma, m]);
53
54
55 # Contraintes de stockage
56 subject to StockInitial {p in PRODUITS}:
57     stock[first(MOISp),p] = 0; # Utilisation de first(MOISp) pour janvier
58
59
60 subject to EquilibreStock {m in MOIS, p in PRODUITS}:
61     stock[next(m, MOISp), p] = stock[m, p] + production[m, p] - vente[m, p];
62
63 subject to StockFinal {p in PRODUITS}:
64     stock[last(MOISp),p] >= stockFinal; # Utilisation de last(MOISp) pour juin
65
66 subject to StockMax {m in MOISp, p in PRODUITS}:
67     stock[m,p] <= stockMax;
68
69
70 ##Nouvelle contrainte de maintenance
71
72 # Contraintes de maintenance pour chaque type de machine
73
74 subject to MaintenanceMachineUnique {ma in ALL_MACHINES_DETAIL } : #pour eviter que ce
    soit a chaque fois la meme broyeuse/foreuse en maintenance
75     sum {m in MOIS} maintenance [ma,m]<=1;
76
77 subject to ContrainteMaintenanceBroyeuses :
78     sum {ma in BROYEUSES} sum {m in MOIS} maintenance[ma, m] >= 2;
79
80 subject to ContrainteMaintenanceForeusesVerticales :
81     sum {ma in FOREUSES_VERTICALES} sum {m in MOIS} maintenance[ma, m] = 2;
82

```

```

83 subject to ContrainteMaintenanceForeusesHorizontales :
84     sum {ma in FOREUSES_HORIZONTALES} sum {m in MOIS} maintenance[ma, m] = 3;
85
86 subject to ContrainteMaintenanceAlesoirs :
87     sum {ma in ALESOIRS} sum {m in MOIS} maintenance[ma, m] = 2;
88
89 subject to ContrainteMaintenanceRaboteuses :
90     sum {ma in RABOTEUSES} sum {m in MOIS} maintenance[ma, m] = 1;
91
92
93
94 # Contraintes de de ventes maximales
95 subject to VenteMaxContrainte {m in MOIS, p in PRODUITS}:
96     vente[m,p] <= venteMax[p,m];
97
98 # Contrainte pour assurer la couverture des ventes des mois suivants
99 subject to CouvertureVenteMoisSuivants {m in MOIS, p in PRODUITS}:
100     vente[m, p] <= production[m, p] + (if m != first(MOISp) then stock[prev(m, MOISp), p
        ] else 0);

```

```

1 # Ensembles pour les produits et machines
2 set PRODUITS := PROD1 PROD2 PROD3 PROD4 PROD5 PROD6 PROD7; # Ensemble des differents
    produits
3 set MACHINES := broyeuses foreuses_verticales foreuses_horizontales alesoirs raboteuses;
    # Machines disponibles
4 set MACHINES_SANS_BROYEUSES_FOREUSES := alesoirs raboteuses; # Machines excluant
    broyeuses et foreuses
5 set ALL_MACHINES_DETAIL := broyeuse1 broyeuse2 broyeuse3 broyeuse4 foreuse_verticale1
    foreuse_verticale2 foreuse_horizontale1 foreuse_horizontale2 foreuse_horizontale3
    alesoirs raboteuses; # Detail des machines
6 set BROYEUSES := broyeuse1 broyeuse2 broyeuse3 broyeuse4; # Les broyeuses specifiques
7 set MOISp := janvier fevrier mars avril mai juin juillet; # Ensemble de tous les mois,
    y compris un mois supplementaire
8 set FOREUSES_VERTICALES := foreuse_verticale1 foreuse_verticale2; # Foreuses verticales
    specifiques
9 set FOREUSES_HORIZONTALES := foreuse_horizontale1 foreuse_horizontale2
    foreuse_horizontale3; # Foreuses horizontales specifiques
10 set ALESOIRS := alesoir1 alesoir2;
11 set RABOTEUSES := raboteuses;
12
13
14 # Nombre de machines disponibles
15 param nombre_machine :=
16 broyeuses          4
17 foreuses_verticales  2
18 foreuses_horizontales  3
19 alesoirs            2
20 raboteuses          1;
21
22 # Prix de vente pour chaque produit
23 param prixVente :=
24 PROD1 10
25 PROD2 6
26 PROD3 8
27 PROD4 4
28 PROD5 11
29 PROD6 9
30 PROD7 3;
31
32
33 # Temps d'utilisation necessaire sur chaque machine pour produire une unite de chaque

```

```

produit
34 param tempsUtilisation : broyeuses foreuses_verticales foreuses_horizontales alesoirs
    raboteuses :=
35 PROD1 0.5 0.1 0.2 0.05 0
36 PROD2 0.7 0.2 0 0.03 0
37 PROD3 0 0 0.8 0 0.01
38 PROD4 0 0.3 0 0.07 0
39 PROD5 0.3 0 0 0.1 0.05
40 PROD6 0.2 0.6 0 0 0
41 PROD7 0.5 0 0.6 0.08 0.05;
42
43
44 #param maintenance : janvier fevrier mars avril mai juin :=
45 #broyeuses 1 0 0 0 1 0
46 #foreuses_verticales 0 0 0 1 0 1
47 #foreuses_horizontales 0 2 0 0 1 0
48 #alesoirs 0 0 0 1 0 0
49 #raboteuses 0 0 0 0 0 1;
50
51 # Limitations des ventes mensuelles pour chaque produit
52 param venteMax : janvier fevrier mars avril mai juin :=
53 PROD1 500 600 300 200 0 500
54 PROD2 1000 500 600 300 100 500
55 PROD3 300 200 0 400 500 100
56 PROD4 300 0 0 500 100 300
57 PROD5 800 400 500 200 1000 1100
58 PROD6 200 300 400 0 300 500
59 PROD7 100 150 100 100 0 60;
60
61
62 # Cout de stockage par produit et stock final souhaite pour chaque produit
63 param stockMax := 100; # Capacite maximale de stockage
64 param coutStockage := 0.5; # Cout de stockage par unite de produit
65 param stockFinal := 50; # Stock final souhaite
66 param nbHeuresParMois := 192; # Nombre total d'heures de travail disponibles par mois
    (8 heures par jour, 24 jours par mois)

```