

1 Contexte – Modèle simplifié

L'optimisation du planning hebdomadaire du broyage du ciment dans une cimenterie correspond à un enjeu important en termes de consommation de ressources énergétiques. En effet, ce broyage représente environ 50 % de la facture d'électricité d'une unité de production.

Schéma de fonctionnement

Une cimenterie est implantée à proximité de carrières d'où sont extraites les matières premières principales (calcaire et argile). Ces produits sont séchés et mélangés pour obtenir une « poudre crue » qui est stockée en attente d'utilisation. L'opération suivante est la cuisson de cette poudre dans des fours pour obtenir un produit semi-fini, le « clinker ». Enfin, ce clinker est broyé finement avec d'autres produits d'ajout pour obtenir le ciment. Le ciment est ensuite stocké dans des silos. En fonction du produit ajouté dans la phase de broyage, on obtient différentes qualités de ciment. Chaque silo est dédié à une qualité de ciment. En revanche, les broyeurs peuvent produire plusieurs qualités.

Optimisation du plan hebdomadaire de broyage

Dans le processus de production, seul le plan de charge de l'atelier de broyage est à optimiser. Cet atelier contient trois broyeurs repérés par l'indice j ($j = 1, 2, 3$). La demande hebdomadaire que l'on doit satisfaire porte sur quatre qualités de produit repérées par l'indice k ($k = 1, 2, 3, 4$). Les données techniques et économiques disponibles dans l'entreprise sont fournies dans les tableaux 1 à 5 suivants.

- Débit d'un broyeur j pour la qualité de ciment k : D_{jk} , exprimé en tonne/heure (t/h)

j/k	1	2	3	4
1	50	50	30	30
2	60	50	50	40
3	80	80	80	70

Table 1: *Débit des broyeurs (en t/h)*

Un broyeur peut fonctionner 24 heures sur 24 pendant 6 jours par semaine. Il peut aussi bien être arrêté une ou plusieurs fois par jour.

- Consommation d'électricité d'un broyeur j pour fabriquer une tonne de produit k : E_{jk} , exprimée en kilowatt-heure par tonne (kWh/t)

j/k	1	2	3	4
1	80	120	120	80
2	100	150	100	120
3	150	140	150	130

Table 2: *Consommation électrique des broyeurs (en kWh/t)*

- Demande hebdomadaire pour le produit k : V_k exprimé en tonnes.

k	1	2	3	4
Demande	7000	2000	8000	2000

Table 3: *Demande hebdomadaire du produit k (en t)*

- Le coût de base du kWh est de 0,10€.
- Pour le produit k le stock initial (disponible en début de semaine), SI_k , et le stock de sécurité, SS_k , dont on doit disposer en fin de semaine, exprimés en tonnes, sont fournis par le tableau suivant.

k	1	2	3	4
Stock initial	2000	0	2000	1000
Stock de sécurité	1000	1000	2000	1000

Table 4: *Stocks initial et de sécurité du produit k (en t)*


- Les coûts de transfert entre une unité de broyage j et un silo stockant le produit k dépendent de la localisation des différentes unités. Ces coûts, T_{jk} , sont exprimés en € par tonne.

j/k	1	2	3	4
1	0	1	2	0
2	2	2	0	1
3	1	0	1	0

Table 5: *Coûts de transfert entre un broyeur j et un silo k (en €/t)*

2 Phase 1 – analyse et modélisation – Environ 2 semaines

Axes principaux

- 
1. Modélisation mathématiques
 2. Analyse de modèles
 3. Aide à la décision

Dans cette phase, on cherche à construire un outil d'aide à la décision pour organiser la production hebdomadaire de l'atelier de broyage. Celle-ci comporte le plan de charge, le transfert du ciment vers les silos, et l'affectation des équipes.

Voici quelques étapes qui peuvent vous aider dans votre analyse :

Etape 1: On cherche à définir le plan de charge de chaque broyeur pour chacune des qualités à produire afin de minimiser le coût de consommation d'énergie électrique uniquement.

- Définir les variables de décision et énumérer l'ensemble des contraintes à respecter
- Formaliser la fonction économique du problème

Etape 2: Introduction des coûts de transferts.

- Une solution optimale de l'Etape 1 (fournie par le solveur du tableur Excel) est donnée dans le tableau 6, en annexe. Analyser l'effet de l'introduction des coûts de transferts sur le plan optimal.


Etape 3: Prise en compte des heures supplémentaires

Le D R H fait remarquer que les deux premiers broyeurs sont occupés 24 h sur 24, et que le surcoût horaire d'une équipe de nuit (entre 21 h et 5 h) par rapport aux autres équipes (5 h - 13 h et 13 h - 21 h) est de 240 €/h. Dans ces conditions, il serait peut être plus économique de réduire au strict minimum les équipes de nuit en rééquilibrant la charge des broyeurs.

- En dehors de toute considération sociale, pensez-vous que cette proposition soit économiquement intéressante ? (vous pourrez utiliser les résultats de l'analyse de sensibilité fournis en annexe (cf. Tableau 6).
- Quel plan proposez-vous sachant que la suppression éventuelle d'une équipe de nuit s'effectue en totalité (on supprime par poste de 8 h) ?
- Construire le programme linéaire intégrant l'impact du surcoût des heures de nuit.

3 Phase 2 – Création d'une application – Environ 4 semaines

Axes principaux

- 
1. Création d'une application
 2. Programmation en Python, Java, C++, ...
 3. Aide à la décision

L'objectif de cette phase est de créer une application (ou un programme ou un site) qui permet d'aider l'entreprise à prendre les décisions optimales. Les langages qui peuvent être utilisés sont (Python, C++, Java). Cette application doit permettre en particulier d'afficher et d'interpréter:


- la stratégie optimale
- l'analyse de sensibilité.

Vous pouvez utiliser des solveurs gratuits pour résoudre le problème d'optimisation définie dans la Phase 1 (par exemple 'IBM CPLEX Optimizer', 'PHPSimplex', ...).

Pensez à sécuriser votre application.

4 Phase 3 – Approfondissement – Environ 4 semaines

Axes principaux

- 
1. Proposer un modèle plus général
 2. Simplifier et manipuler un grand jeu de données
 3. Adapter votre application à ce modèle
 4. Améliorer les performances de votre application

Le modèle proposé dans la première partie (Contexte) était simplifié. En réalité, on peut être amené à étudier des problèmes beaucoup plus complexes (en terme de nombre de variables, nombre de contraintes, les contraintes eux-mêmes, ...), par exemple:

- plusieurs sites
- plusieurs broyeurs, de différents types
- des horaires décalés

- des différents coûts entre les broyeurs
- système complexe pour gérer les heures supplémentaires, ...

Le travail demandé dans cette phase consiste, en particulier, à :

- a. Proposer un modèle réel et plus général que celui de la Phase 1
- b. Adapter l'application informatique déjà créée pour résoudre le problème proposé
- c. Pour des jeux de données de grande taille, vous pouvez mener une étude statistique avant d'entamer l'optimisation (proposer vos propres jeux de données)
- d. Pour ce modèle, proposer et implémenter une stratégie qui permet d'améliorer la performance et l'efficacité de votre application (en terme de temps de résolution par exemple ...)

5 Déroulement du projet

Le projet s'articule autour de 3 phases:

1. Modélisation et analyse d'un problème d'optimisation
2. Création d'une application d'aide à la décision
3. Modéliser et implémenter un problème d'optimisation avec des grands jeux de données

Une étude critique des résultats sera la finalité de votre travail.

Après chaque phase d'analyse volontairement orientée et ouverte, une mise au point auprès de votre enseignant référent aura lieu afin de permettre d'avancer dans le bon sens et d'avoir des objectifs clairs et précis.

Code et programme

Le programme sera écrit dans un langage de votre choix (Python, Java, C++). Il doit être fourni avec une interface claire permettant son exploitation. Ce programme sera rendu avec un mode d'emploi permettant d'expliquer son utilisation.

Rapport et soutenance

Un rapport reprenant le travail d'analyse initial augmenté des aspects de réalisation sera fourni. Une soutenance viendra clôturer ce projet. La soutenance devra précisément mettre en évidence les résultats avoir un avis critique sur ces résultats.

6 Modalités

Ce projet doit être réalisé par groupes de 5 élèves. La qualité du rapport, de la soutenance, du code et le bon fonctionnement de celui-ci contribueront à la note finale de votre projet. Les livrables doivent être rendus à la date fixée. Le travail en équipe doit une part importante dans l'évaluation du projet. Une soutenance de présentation de votre travail d'une durée de 20 minutes par groupe vous sera demandée.

7 Deadlines: Les livrables, Rapport et Soutenance

- **11 Avril** : Livrable 1 (Phase1 et l'avancement en Phase 2)
- **6 Mai** : Livrable 2 (Phase2 et l'avancement en Phase 3)
- **20 Mai** : Envoi du rapport final aux enseignants référents
- **Entre 23 Mai et 27 Mai** : Les soutenances

8 Parties à traiter en priorité

Voici les parties à traiter en priorité pour chaque phase:

- Phase 1: Etape 1
- Phase 2: Création de l'application et affichage de la stratégie optimale
- Phase 3: Proposer un modèle plus général et l'intégrer dans l'application

ANNEXE

Solution optimale et étude de sensibilité du plan de broyage

Variables

1E+30=infini

Nom	Valeur Finale	Coût Réduit	Coefficient Objectif	Augmentation Admissible	Réduction Admissible
X11	120	0	400	158	550
X12	0	50	600	1E+30	50
X13	0	60	360	1E+30	60
X14	24	0	240	50	158
X21	0	190	600	1E+30	190
X22	0	300	750	1E+30	300
X23	144	0	500	190	1E+30
X24	0	210	480	1E+30	210
X31	0	320	1200	1E+30	320
X32	38	0	1120	80	1120
X33	10	0	1200	160	304
X34	18	0	910	367	117

Contraintes

Nom	Valeur Finale	Coût dual	Contrainte à droite	Augmentation admissible	Réduction admissible
Production K1	6000	11	6000	1200	2133
Production K2	3000	14	3000	6257	3000
Production K3	8000	15	8000	6257	800
Production K4	2000	13	2000	5475	1280
Capacité J1	144	-150	144	43	24
Capacité J2	144	-250	144	16	125
Capacité J3	66	0	144	1E+30	78

Table 6: Résultats du plan de broyage (tableur Excel)