

Louvain School of Management

L'optimisation de la production de coke dans un groupe de cokeries

Auteures : Hermand Emeline & Kiebooms Eline

Promoteur : Daniel De Wolf

Année académique 2022-2023

Travail de fin d'études (TFE) en vue d'obtenir le titre d'ingénieur de gestion, à finalité spécialisée

Horaire de jour

Résumé :

Ce mémoire-projet a pour but de planifier les achats, le transport vers les cokeries des charbons et la planification de production de coke pour un groupe de 5 cokeries, tout en respectant certains prérequis imposés par les clients.

Pour réaliser cela, nous avons écrit un modèle mathématique reprenant toutes nos contraintes et nous l'avons encodé dans le logiciel GAMS. Pour simplifier la résolution de ce problème non-linéaire, en nombres entiers et de grande taille, nous avons utilisé la décomposition de Benders. Avant toute chose, nous avons commencé par résoudre un problème linéaire. Après le bon fonctionnement de celui-ci, les contraintes non-linéaires ont été ajoutées.

Nous obtenons un objectif final s'élevant à 68 240 894,46€. Nous avons suggéré quelques pistes d'améliorations que l'entreprise pourrait réaliser grâce une analyse détaillée du stock aux ports, de l'utilisation des soles doseuses, de la capacité de production mensuelle utilisée,...

Ces améliorations seraient d'investir dans plus de soles doseuses car la cokerie 2 les utilise toutes à chaque période, de diminuer les livraisons pour certains charbons qui augmentent le stock et d'accepter plus de clients lorsque l'entreprise n'utilise pas toute sa capacité.

Pour finir, les limitations de ce mémoire sont l'utilisation de toute la capacité de la cokerie 1 en janvier et février qui pourrait poser problème si nous devons servir plus de clients. La dernière limitation concerne l'objectif qui n'est pas une bonne interprétation du coût réellement engendré, dû au coût nul du stockage des charbons arrivant par train.

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN
Louvain School of Management

Place des Doyens, 1 bte L2.01.01, 1348 Louvain-la-Neuve
Boulevard Emile Devreux 6, 6000 Charleroi, Belgique
Chaussée de Binche 151, 7000 Mons, Belgique

www.uclouvain.be/lsm

La réalisation de ce mémoire n'aurait pu être possible sans certaines personnes et nous tenons à leur témoigner toute notre gratitude.

Tout d'abord, nous adressons nos sincères remerciements à notre promoteur de mémoire, Daniel De Wolf. Nous sommes reconnaissantes qu'il nous ait guidées, conseillées et aidées tout au long de la réalisation de ce mémoire. Nous le remercions surtout pour son soutien et sa présence lorsque nous rencontrions quelques difficultés.

Nous tenons aussi à remercier tous nos professeurs et assistants depuis le début de nos études à l'université. Nous les remercions pour l'enseignement prodigué ainsi que les connaissances qu'ils nous ont partagées depuis quelques années.

Nous remercions aussi notre famille proche pour le soutien apporté quand nous étions au plus bas ainsi que pour le regain de motivation que vous nous donniez. Nous sommes aussi reconnaissantes envers nos amis qui nous ont soutenues et changé les idées.

Nous voulons aussi adresser notre gratitude à nos maîtres de stages, Audrey Chalon, Emilie Ouin et Guillaume Speeckaert, pour la vision plus concrète et réelle de la solution que ce mémoire-projet pourrait apporter à une entreprise

Enfin, nous remercions nos relectrices, Florence Leprope et Virginie Delaive, qui ont été efficaces lors de la relecture.

Table des matières

1. Introduction	1
2. Présentation du problème	3
3. Modélisation du problème	4
4. Méthode de résolution	15
4.1 <i>Présentation de la décomposition de Benders</i>	15
4.2 <i>Application au problème</i>	16
5. Résultat du modèle et analyse de la solution	30
5.1 <i>Les 5 premières itérations</i>	30
5.2 <i>Analyse de la solution</i>	32
6. Conclusions	39
Bibliographie	42
Annexes	43
<i>Annexe 1: Ecriture des sous-problèmes sur GAMS</i>	43
<i>Annexe 2 : Ecriture du maître-problème sur GAMS</i>	55
<i>Annexe 3: Solution des sous-problèmes de la cinquième itération</i>	66
<i>Annexe 4 : Solution du maître-problème à la cinquième itération</i>	68
<i>Annexe 5 : Pourcentage de perte après le processus du haut-fourneau</i>	126

1. Introduction

Ce mémoire est un mémoire-projet non lié à un stage. En effet, toutes deux nous voulions trouver un mémoire touchant au supply chain management et, plus spécifiquement, un mémoire-projet et non un mémoire où il faut répondre à une question de recherche. Pour nous, un mémoire-projet est plus pertinent qu'une question de recherche et beaucoup plus concret à réaliser.

Le thème de ce mémoire a été proposé par notre superviseur, Daniel De Wolf, qui a été directement parlant et attirant pour chacune d'entre nous. Le thème de ce mémoire est l'optimisation de la production de coke dans un groupe de cokeries. Le problème sera expliqué plus en détails dans la section suivante. De plus, ce sujet reste dans la continuité de nos études et de notre majeure en supply chain management. En outre, il nous permet aussi d'appliquer la théorie vue en cours et nos connaissances sur le sujet.

Nous avons commencé par décortiquer le problème et faire un schéma des étapes pour avoir une vision plus claire. Quand ceci a été fait, nous avons écrit la formulation mathématique du problème ensemble. Par la suite, nous avons analysé le fonctionnement du logiciel GAMS qui est utilisé pour la résolution du problème. Avant de coder dans GAMS, nous avons mis au clair la méthodologie à adopter pour la résolution : la décomposition de Benders, comment séparer notre problème en un maître-problème et des sous-problèmes, les boucles et les itérations. Après toutes les itérations sorties, l'écriture concernant l'analyse a pu être commencée.

À chaque étape terminée, celle-ci a été rédigée de suite pour ne pas être surchargées par l'écriture dans les dernières semaines. Les étapes importantes de ce mémoire étant :

- Compréhension du problème
- Écriture du problème en notation mathématique
- Compréhension de GAMS
- Compréhension de la décomposition de Benders
- Programmation
- Analyse
- Écriture finale

Nous tenons à préciser, qu'après chaque étape importante dans la résolution du problème, nous avions une réunion avec notre superviseur. Monsieur De Wolf nous donnait quelques feedbacks et commentaires sur ce qui avait été réalisé et nous discutons des étapes suivantes et de la méthodologie à adopter.

Finalement, nous avons rencontré quelques difficultés. Une des premières étant notre Erasmus. En effet, ayant un décalage horaire assez important entre nos deux pays, cela était difficile d'organiser des réunions qui arrangeaient tout le monde et de travailler ensemble. C'est pour cela, que nous avons favorisé le partage des tâches. Une seconde difficulté concerne la programmation et trouver les erreurs quand le logiciel ne nous fournit pas de solution faisable. La dernière difficulté étant de se mettre à jour sur ce que l'autre a réalisé de son côté car, parfois, on ne comprend pas directement ce qui a été fait.

2. Présentation du problème

Dans cette partie, nous allons expliquer le fonctionnement de l'entreprise que nous étudions. Tout d'abord, celle-ci commande différents types de charbons. En fonction de leur provenance, ceux-ci sont soit livrés par train jusqu'aux cokeries soit livrés par bateau jusqu'aux ports. Ensuite, des ports, ces derniers sont transportés jusqu'aux cokeries. La quantité reçue par les cokeries dépend du mélange réalisé par celles-ci ainsi que de la quantité demandée par les clients à chacune des cokeries.

Vous pouvez trouver ci-dessous en figure 1 un graphique de réseau illustrant les étapes de livraison jusqu'aux unités de production.

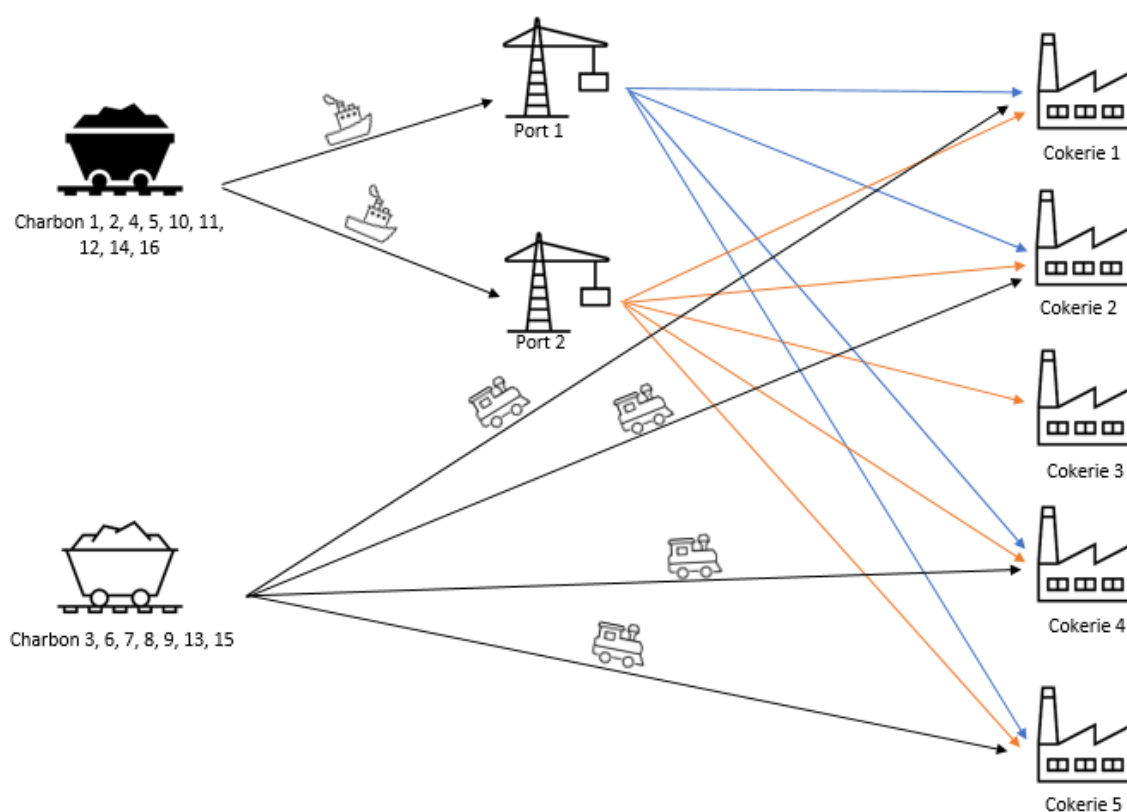


Figure 1: Graphique de réseau

Notre but est d'optimiser les mélanges de charbons produits par les cokeries à moindres coûts, tout en respectant les prérequis des différents clients, ainsi que de planifier les achats et le transport vers les cokeries de tous les charbons. Pour cela, nous réaliserons un problème mathématique avec les différentes contraintes à respecter. La résolution de ce problème nous mènera aux mélanges optimaux pour le bon fonctionnement de l'entreprise.

3. Modélisation du problème

• Indices

- $t \in T = \{1,2,3\}$ Les trois premiers mois de production
- $u \in U = \{1..5\}$ Les cinq usines de production
- $c \in C = \{1..16\}$ Les sortes de charbon
- $cb \in C1 = \{1, 2, 4, 5, 10, 11, 12, 14, 16\} \subseteq C$ Les sortes de charbon venant par bateau
- $ct \in C2 = \{3, 6, 7, 8, 9, 13, 15\} \subseteq C$ Les sortes de charbon venant par train
- $p \in P = \{1,2\}$ Les deux ports
- $a \in A = \{1..13\}$ Les différents acheteurs
- $lv \in C = \{1,2,3,4,14\} \subseteq C$ Les charbons de type low-volume
- $mv \in C = \{5,13,15\} \subseteq C$ Les charbons de type mid-volume
- $hv \in C = \{6,7,8,9,10,11,12,16\} \subseteq C$ Les charbons de type high-volume
- $s \in C = \{12\} \subseteq C$ Le charbon de type soft
- $aus \in C = \{4\} \subseteq C$ Le charbon de type australien
- $cau \in A \cup U = \{1.3,2.1,3.1,4.2,4.3,5.3,6.1,6.2,7.2,8.2,9.1,10.2,11.3,12.4,13.5\} \subseteq A \cup U$
Lien entre les cokeries et les acheteurs qu'elles servent
- $m \in M = \{1 \dots n\}$ Les mélanges, n étant le nombre de mélanges faisables mis à disposition

• Paramètres

- $CapacitéMax_u$ La capacité maximale journalière de la cokerie u
- $TauxMin_u$ Le taux minimal requis pour le fonctionnement de la cokerie u
- $NbSoles_u$ Le nombre de soles doseuses à la cokerie u
- $MinSoles_u$ La proportion minimale de charbon présente dans le mélange à la cokerie u
- $MaxSoles_u$ La proportion maximale de charbon présente dans le mélange à la cokerie u
- $CoûtProd_{u,t}$ Le coût de production à la cokerie u durant la période t
- $TeneurCendres_c$ La teneur en cendres du charbon c
- $TeneurSoufre_c$ La teneur en soufre du charbon c
- $TeneurAlcali_c$ La teneur en alcali du charbon c
- $TeneurVolatile_c$ La teneur en matières volatiles du charbon c
- $TeneurInertes_c$ La teneur en matières inertes du charbon c
- $PouvoirAgglu_c$ Le pouvoir agglutinant des matières réactives du charbon c
- $FluiditéG_c$ La fluidité maximale de Gieseler du charbon c
- $Humidité_c$ La teneur en humidité du charbon c
- $InitStock_{p,cb}$ Le stock initial du charbon cb au port p
- $LivraisonAttendueBateau_{cb,t}$ Livraisons prévues du charbon cb en période t par bateau
- $LivraisonAttendueTrain_{ct,t}$ Livraisons prévues du charbon ct en période t par train
- $TauxOpportunité = 0,5\%$ Le taux d'opportunité pour calculer le coût de détention
- $TauxChange_t$ Le taux de change de USD en € pour la période t

- $PrixCharbon_{c,t}$ Le prix (USD et €) du charbon c au temps t
- $CoûtTransportBateau_{cb,p}$ Le coût de transport (USD) en bateau du charbon cb jusqu'au port p
- $CoûtManutention_p$ Le coût de manutention (€) au port p
- $CoûtTransportCokerie_{p,u}$ Le coût de transport (€) du port p à la cokerie u
- $CoûtTransportTrain_{ct,u}$ Le coût de transport (€) du charbon ct vers la cokerie u
- $Demande_{a,t}$ La demande du client a en période t
- $MinVolatile = 24\%$ Le taux minimal en teneur volatile
- $MaxVolatile = 26\%$ Le taux maximal en teneur volatile
- $CendresMax_u$ La teneur en cendres maximale acceptée dans la cokerie u, calculée en considérant le minimum en teneur en cendres demandé par les clients possibles de la cokerie u (le taux du client le plus exigeant)
- $SoufreMin_u$ La teneur en soufre minimale pour la cokerie u, calculée en considérant le maximum en teneur en soufre demandé par les clients possibles de la cokerie u (le taux du client le plus exigeant)
- $SoufreMax_u$ La teneur en soufre maximale pour la cokerie u, calculée en considérant le minimum en teneur en soufre demandé par les clients possibles de la cokerie u (le taux du client le plus exigeant)
- $AlcaliMax_u$ La teneur en alcali maximale pour la cokerie u, calculée en considérant le minimum en teneur en alcali demandé par les clients possibles de la cokerie u (le taux du client le plus exigeant)
- $LVMin_u$ La teneur minimale en charbon Low Volume à la cokerie u, calculée en considérant le minimum en teneur en charbon Low Volume demandé par les clients possibles de la cokerie u (le taux du client le plus exigeant)
- $LVMax_u$ La teneur maximale en charbon Low Volume à la cokerie u, calculée en considérant le minimum en teneur en charbon Low Volume demandé par les clients possibles de la cokerie u (le taux du client le plus exigeant)
- $CoeffPassantCendres = 1,32$ Le coefficient passant des cendres dans le mélange
- $CoeffPassantSoufre = 0,92$ Le coefficient passant du soufre dans le mélange
- $CoeffPassantAlcali = 1,32$ Le coefficient passant de l'alcali dans le mélange
- $MVMax = 0,25$ La teneur maximale en charbon mid-volume dans le mélange
- $MVMin = 0,25$ La teneur minimale en charbon mid-volume dans le mélange
- $SoftMax = 0,10$ La teneur maximale en charbon soft dans le mélange
- $I10Max = 23$ La valeur maximale qu'I10 peut prendre
- $I20Min = 76,5$ La valeur minimale qu'I20 peut prendre
- $Nbjour_t$ Le nombre de jours dans le mois (1 = 31, 2 = 28, 3 = 31)
- $NbMélange_{u,t}$ Le nombre de mélanges pouvant être réalisé durant la période t à l'usine u
- $MaxCharbonAustralien = 30\%$ La teneur maximale en charbon australien dans le mélange

- **Variables**

- $QCharbon_{u,t,c,m}$ La quantité de charbon c utilisée pour le mélange m dans la cokerie u durant la période t
- $QMélange_{u,t,m}$ La quantité totale de mélange formé m de la cokerie u au temps t
- $QProduit_{u,t,m}$ La quantité de charbon à la sortie du fourneau tenant compte de la perte d'humidité
- $QCommandéeBateau_{cb,t}$ La quantité de charbon cb commandée au temps t auprès du fournisseur
- $QCommandéeTrain_{ct,t}$ La quantité de charbon ct commandée au temps t auprès du fournisseur
- $CommandeRecuePort_{t,cb,p}$ La quantité de charbon cb reçue au port p au temps t
- $QStockPort_{cb,t,p}$ La quantité stockée de charbon cb au port p durant le temps t
- $QTransportPortCokerie_{cb,p,u,t}$ La quantité de charbon cb transportée du port p à la cokerie u au temps t
- $QTransportTrain_{ct,u,t}$ La quantité de charbon ct transportée par train jusqu'à la cokerie u au temps t
- $TICM_{m,u}$ La teneur en matières inertes du mélange m à la cokerie u
- $RCIM_{m,u}$ Le pouvoir agglutinant des matières réactives du mélange m à la cokerie u
- $LGFM_{m,u}$ La fluidité maximale de Gieseler du mélange m à la cokerie u
- $I10_{m,u}$ Le paramètre I10 du mélange m à la cokerie u
- $I20_{m,u}$ Le paramètre I20 du mélange m à la cokerie u
- $BinCharbon_{u,t,c,m} =$
 $\{1 \text{ si charbon } c \text{ utilisé pour le mélange } m \text{ à la cokerie } u \text{ au temps } t \ 0 \text{ sinon}$
- $BinMélangeUtilise_{t,u,m} =$
 $\{1 \text{ si le mélange } m \text{ est bien utilisé à la cokerie } u \text{ au temps } t \ 0 \text{ sinon}$
- $Qdemcok_{u,a,t}$ La quantité servie par l'usine u à l'acheteur a au temps t
- $QTrainUtilisé_{ct,u,t}$ La quantité utilisée de charbon ct à l'usine u au temps t
- $QStockCokerie_{ct,u,t}$ La quantité stockée de charbon ct à l'usine u au temps t

- **Hypothèses**

Nous supposons que les coûts de transport jusqu'aux ports, de manutention et d'achat, des charbons déjà présents dans le stock des ports, ont été comptabilisés durant les périodes précédentes.

Nous ignorons aussi le fait que la livraison des charbons prend du temps et peut être variable dû à certaines circonstances. Le délai de livraison du transport n'est donc pas pris en compte.

De plus, pour les charbons venant par train, nous faisons l'hypothèse que les cokeries peuvent stocker les charbons. Ce stock ayant un coût nul dans ce modèle.

Enfin, nous travaillons en tonnes pour toutes les quantités de charbon ainsi que pour les prix.

- **Fonction d'objectif**

Nous avons décidé de trouver la solution optimale des mélanges qui minimise le coût total. Pour cela, nous avons considéré les différents coûts mis à disposition. L'objectif est donc composé de plusieurs termes :

- (1) Le coût d'achat de chaque tonne de charbon voyageant par bateau acheté durant la période t
- (2) Le coût d'achat de chaque tonne de charbon voyageant par train acheté durant la période t
- (3) Le coût de transport par bateau du charbon jusqu'aux ports
- (4) Le coût de manutention de chaque tonne de charbon aux ports
- (5) Le coût de détention en stock, calculé en appliquant un taux d'opportunité de 0,5% aux coûts d'achat, de transport jusqu'aux ports et de manutention pour représenter le coût de stock aux ports
- (6) Le coût de transport de chaque tonne de charbon des ports aux cokeries
- (7) Le coût de transport de chaque tonne de charbon venant par train jusqu'aux cokeries
- (8) Le coût de production par tonnes de charbon présent dans chaque cokerie durant la période t

$$\begin{aligned}
 & \min. \text{ CoûtTotal} = \\
 & \sum_{p,t,cb} \text{PrixCharbon}_{cb,t} \times \text{CommandeRecuePort}_{t,cb,p} \times \text{TauxChange}_t \\
 & \quad + \sum_{u,t,ct} \text{PrixCharbon}_{ct,t} \times Q\text{TransportTrain}_{ct,u,t} \\
 & + \sum_{p,t,cb} \text{CoûtTransportBateau}_{cb,p} \times \text{CommandeRecuePort}_{t,cb,p} \times \text{TauxChange}_t
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \sum_{p,t,cb} CoûtManutention_p \times CommandeRecuePort_{t,cb,p} \\
+ \sum_{p,t,cb} QStockPort_{cb,t,p} \times TauxOpportunité \times [CoûtManutention_p + \\
& (CoûtTransportBateau_{cb,p} + PrixCharbon_{cb,t}) \times TauxChange_t] \\
+ \sum_{cb,p,u,t} CoûtTransportCokerie_{p,u} \times QTransportPortCokerie_{cb,p,u,t} \\
& + \sum_{ct,u,t} CoûtTransportTrain_{ct,u} \times QTransportTrain_{ct,u,t} \\
& + \sum_{u,t,c,m} CoûtProd_{u,t} \times QCharbon_{u,t,c,m}
\end{aligned}$$

- **Contraintes**

(1) Le nombre de charbons utilisé dans un mélange ne peut dépasser le nombre de soles doseuses disponibles dans chaque cokerie :

$$\sum_c BinCharbon_{u,t,c,m} \leq NbSoles_u \quad \forall u, t, m$$

(2) La quantité de charbon entrée dans le haut fourneau ne peut dépasser la capacité mensuelle maximale :

$$\sum_m QMelange_{u,t,m} \leq CapacitéMax_u \times Nbjour_t \quad \forall u, t$$

(3) La quantité de charbon entrée dans le haut fourneau doit au moins atteindre le taux de fonctionnement minimal requis :

$$\sum_m QMelange_{u,t,m} \geq TauxMin_u \times CapacitéMax_u \times Nbjour_t \quad \forall u, t$$

(4) La quantité de charbon entrée doit au moins atteindre la proportion minimale qu'une sole doseuse peut charger dans chaque cokerie :

$$MinSoles_u \times BinCharbon_{u,t,c,m} \leq \frac{QCharbon_{u,t,c,m}}{QMelange_{u,t,m}} \quad \forall u, t, c, m$$

(5) La quantité de charbon entrée ne peut dépasser la proportion maximale qu'une sole do-
seuse peut charger dans chaque cokerie :

$$MaxSoles_u \times BinCharbon_{u,t,c,m} \geq \frac{QCharbon_{u,t,c,m}}{QMelange_{u,t,m}} \quad \forall u, t, c, m$$

(6) La quantité de produit fini (après mélange) vaut la quantité entrée de chaque charbon
après la perte de matière due au taux d'humidité :

$$QProduit_{u,t,m} = \sum_c QCharbon_{u,t,c,m} \times (1 - Humidité_c) \quad \forall u, t, m$$

(7) & (8) La quantité de charbon stockée au port est égale au stock de la période précédente
avec la quantité arrivant au port moins ce qui en sort pour être distribué aux cokeries :

$$QStockPort_{cb,t,p} = QStockPort_{cb,t-1,p} + CommandeRecuePort_{t,cb,p} - \sum_u QTransportPortCokerie_{cb,p,u,t} \quad \forall cb, t > 1, p$$

$$QStockPort_{cb,1,p} = InitStock_{p,cb} + CommandeRecuePort_{1,cb,p} - \sum_u QTransportPortCokerie_{cb,p,u,1} \quad \forall cb, p$$

(9) La somme des quantités de charbon entrées vaut la quantité totale de mélange dans le
fourneau :

$$\sum_c QCharbon_{u,t,c,m} = QMelange_{u,t,m} \quad \forall u, t, m$$

(10) La quantité de charbon utilisée dans le mélange correspond à la quantité de charbon
que la cokerie a reçue par train durant la même période :

$$QTrainUtilisé_{ct,u,t} = \sum_m QCharbon_{u,t,ct,m} \quad \forall u, t, ct$$

(11) La quantité de charbon utilisée dans le mélange correspond à la quantité de charbon que la cokerie a reçue des ports durant la même période :

$$\sum_p QTransportPortCokerie_{cb,p,u,t} = \sum_m QCharbon_{u,t,cb,m} \quad \forall u, t, cb$$

(12) La quantité de charbon transportée en train jusque chaque cokerie ne peut excéder la quantité commandée pour cette même période venant en train :

$$\sum_u QTransportTrain_{ct,u,t} = \text{LivraisonAttendueTrain}_{ct,t} + QCommandéeTrain_{ct,t} \quad \forall t, ct$$

(13) La quantité de charbon, transportée en bateau jusque chaque port, ne peut excéder la quantité commandée pour cette même période venant en bateau :

$$\sum_p \text{CommandeRecuePort}_{t,cb,p} = \text{LivraisonAttendueBateau}_{cb,t} + QCommandéeBateau_{cb,t} \quad \forall t, cb$$

(14) La quantité de produits finis d'une cokerie doit satisfaire la demande de chacun des clients que celle-ci doit servir :

$$\sum_m QProduit_{u,t,m} = \sum_a Qdemcok_{u,a,t} \quad \forall t, u$$

(15) La somme des quantités servies par chaque cokerie p à un client j doit au moins satisfaire sa demande :

$$\text{Demande}_{a,t} \leq \sum_{u \in \text{cau}} Qdemcok_{u,a,t} \quad \forall a, t$$

(16) La teneur en matières volatiles ne peut pas dépasser un certain pourcentage :

$$\frac{\sum_c \text{TeneurVolatile}_c \times QCharbon_{u,t,c,m}}{QMelange_{u,t,m}} \leq \text{MaxVolatile} \quad \forall m, u, t$$

(17) La teneur en matières volatiles doit au moins atteindre un certain pourcentage :

$$\frac{\sum_c TeneurVolatile_c \times QCharbon_{u,t,c,m}}{QMelange_{u,t,m}} \geq MinVolatile \quad \forall m, u, t$$

(18) La teneur en Cendres ne peut pas dépasser un certain pourcentage. Ce pourcentage correspond aux exigences minimales des clients susceptibles de venir à la cokerie :

$$\frac{\sum_c TeneurCendres_c \times QCharbon_{u,t,c,m}}{\sum_c QCharbon_{u,t,c,m}} \times CoeffPassantCendres \leq CendresMax_u \quad \forall m, u, t$$

(19) La teneur en Soufre ne peut pas dépasser un certain pourcentage. Ce pourcentage correspond aux exigences minimales des clients susceptibles de venir à la cokerie :

$$\frac{\sum_c TeneurSoufre_c \times QCharbon_{u,t,c,m}}{\sum_c QCharbon_{u,t,c,m}} \times CoeffPassantSoufre \leq SoufreMax_u \quad \forall m, u, t$$

(20) La teneur en Soufre doit au moins atteindre un certain pourcentage. Ce pourcentage est calculé selon l'exigence maximale des clients susceptibles de venir à la cokerie :

$$\frac{\sum_c TeneurSoufre_c \times QCharbon_{u,t,c,m}}{\sum_c QCharbon_{u,t,c,m}} \times CoeffPassantSoufre \geq SoufreMin_u \quad \forall m, u, t$$

(21) La teneur en Alcali ne peut pas dépasser un certain pourcentage. Ce pourcentage correspond aux exigences minimales des clients susceptibles de venir à la cokerie :

$$\frac{\sum_c TeneurAlcali_c \times QCharbon_{u,t,c,m}}{\sum_c QCharbon_{u,t,c,m}} \times CoeffPassantAlcali \leq AlcaliMax_u \quad \forall m, u, t$$

(22) La teneur en Low Volume ne peut pas dépasser un certain pourcentage. Ce pourcentage correspond aux exigences minimales des clients susceptibles de venir à la cokerie :

$$\sum_{c \in lv} QCharbon_{u,t,c,m} \leq LVMax_u \quad \forall m, u, t$$

(23) La teneur en Low Volume doit au moins atteindre un certain pourcentage. Ce pourcentage est calculé selon l'exigence maximale des clients susceptibles de venir à la cokerie :

$$\sum_{c \in lv} QCharbon_{u,t,c,m} \geq LVMin_u \quad \forall m, u, t$$

(24) La teneur en Mid Volume ne peut pas dépasser un certain pourcentage :

$$\sum_{c \in mv} QCharbon_{u,t,c,m} \leq MVMax \quad \forall m, u, t$$

(25) La teneur en Mid Volume doit au moins atteindre un certain pourcentage :

$$\sum_{c \in mv} QCharbon_{u,t,c,m} \geq MVMin \quad \forall m, u, t$$

(26) La teneur en Soft ne peut pas dépasser un certain pourcentage :

$$\sum_{c \in s} QCharbon_{u,t,c,m} \leq SoftMax \quad \forall m, u, t$$

(27) Le paramètre I10 ne peut dépasser une certaine valeur maximale :

$$I10_{m,u} \leq I10Max \quad \forall m, u$$

(28) Le paramètre I20 doit dépasser une certaine valeur minimale :

$$I20_{m,u} \geq I20Min \quad \forall m, u$$

(29) Le paramètre TCIM est calculé en fonction de la teneur inerte des charbons présents dans ce mélange ainsi que de la quantité de chacun de ces charbons. Ainsi la teneur inerte d'un charbon a plus de poids si ce charbon est présent en grande quantité dans le mélange et inversement :

$$TICM_{m,u} = \frac{\sum_c TeneurInertes_c \times QCharbon_{u,t,c,m}}{\sum_c QCharbon_{u,t,c,m}} \quad \forall u, t, m$$

(30) Le paramètre RCIM est calculé, comme donné dans le cas, c'est-à-dire en fonction du pouvoir agglutinant, ainsi qu'en prenant en compte la teneur non inerte, du charbon présent dans le mélange. Ainsi le pouvoir agglutinant d'un charbon a plus de poids si ce charbon est présent en grande quantité dans le mélange et inversement :

$$RCIM_{m,u} = \frac{\sum_c QCharbon_{u,t,c,m} \times (100 - TeneurInertes_c) \times PouvoirAgglu_c}{\sum_c QCharbon_{u,t,c,m} \times (100 - TeneurInertes_c)} \quad \forall u, t, m$$

(31) Le paramètre LGFM est calculé, comme donné dans le cas, c'est-à-dire en fonction de la fluidité de Gieseler du charbon présent dans le mélange. Ainsi la fluidité de Gieseler d'un charbon a plus de poids si ce charbon est présent en grande quantité dans le mélange et inversement :

$$LGFM_{m,u} = \frac{\sum_c FluiditéG_c \times QCharbon_{u,t,c,m}}{\sum_c QCharbon_{u,t,c,m}} \quad \forall u, t, m$$

(32) L'indice I20 est calculé comme donné dans le cas, c'est à dire dépendant de TCIM, RCIM et LGFM :

$$\begin{aligned} I20_{m,u} = & -1,64 \times TICM_{m,u} + 209,1 \times RCIM_{m,u} + 58,96 \times LGFM_{m,u} + 0,0168 \\ & \times TICM_{m,u}^2 - 110,8 \times RCIM_{m,u}^2 - 13,16 \times LGFM_{m,u}^2 - 108,66 \\ & \times RCIM_{m,u} \times LGFM_{m,u} + 0,818 \times LGFM_{m,u} \times TICM_{m,u} + 1,015 \\ & \times LGFM_{m,u}^3 + 43,34 \times RCIM_{m,u}^2 \times LGFM_{m,u} + 6,32 \times RCIM_{m,u} \\ & \times LGFM_{m,u}^2 - 0,02028 \times TICM_{m,u}^2 \times LGFM_{m,u} + 0,663 \times TICM_{m,u} \\ & \times RCIM_{m,u} \times LGFM_{m,u} - 6,1 \quad \forall u, m \end{aligned}$$

(33) L'indice I20 est calculé comme donné dans le cas, c'est à dire dépendant de TCIM, RCIM et LGFM :

$$\begin{aligned}
 I10_{m,u} = & 1,625 \times TICM_{m,u} - 200,7 \times RCIM_{m,u} - 61,9 \times LGFM_{m,u} - 0,0159 \\
 & \times TICM_{m,u}^2 + 105,8 \times RCIM_{m,u}^2 + 12,52 \times LGFM_{m,u}^2 + 114,83 \\
 & \times RCIM_{m,u} \times LGFM_{m,u} - 0,654 \times LGFM_{m,u} \times TICM_{m,u} - 0,938 \\
 & \times LGFM_{m,u}^3 - 47,02 \times RCIM_{m,u}^2 \times LGFM_{m,u} - 6,03 \times RCIM_{m,u} \\
 & \times LGFM_{m,u}^2 + 0,01761 \times TICM_{m,u}^2 \times LGFM_{m,u} - 0,734 \times TICM_{m,u} \\
 & \times RCIM_{m,u} \times LGFM_{m,u} + 101 \quad \forall u, m
 \end{aligned}$$

(34) On ne peut pas faire plus d'un certain nombre de mélanges par période à chaque coke-rie :

$$\sum_m BinMelangeUtilise_{t,u,m} \leq NbMélange_{u,t} \quad \forall u, t$$

(35) La teneur en charbon australien ne peut pas dépasser un certain pourcentage :

$$\sum_{c \in aus} QCharbon_{u,t,c,m} \leq MaxCharbonAustralien \quad \forall m, u, t$$

(36) La relation entre la binaire qui nous dit si le charbon est utilisé dans le mélange, et la quantité de charbon se trouvant dans ce même mélange :

$$BinCharbon_{u,t,c,m} \times CapacitéMax_u \times Nbjour_t \geq QCharbon_{u,t,c,m} \quad \forall u, t, c, m$$

(37) La relation entre la binaire qui nous dit si un mélange est réalisé, et la quantité produite de ce même mélange :

$$BinMelangeUtilise_{t,u,m} \times CapacitéMax_u \times Nbjour_t \geq QMélange_{u,t,m} \quad \forall u, t$$

(38) & (39) La quantité de charbon stockée aux cokeries est égale au stock de la période précédente avec la quantité arrivant aux cokeries moins ce qui en sort pour être utilisé dans le mélange :

$$\begin{aligned}
 QStockCokerie_{ct,u,t} = & QStockCokerie_{ct,u,t-1} \\
 + QTransportTrain_{ct,u,t} - & QTrainUtilisé_{ct,u,t} \quad \forall ct, t > 1, u
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 QStockPort_{cb,1,p} = & QTransportTrain_{ct,u,1} \\
 - QTrainUtilisé_{ct,u,1} & \quad \forall ct, p
 \end{aligned}$$

4. Méthode de résolution

Nous allons commencer par introduire la théorie concernant la décomposition de Benders, qui sera utilisée pour notre résolution. Ensuite, nous aborderons notre méthodologie pour l'application de cette théorie au problème.

4.1 Présentation de la décomposition de Benders

La décomposition de Benders est un algorithme créé en 1962 par Benders. Son principal objectif étant de gérer des problèmes avec des variables compliquant le problème, en fixant certaines de ces variables et ainsi rendre la résolution plus facile. Cette méthode est aussi appelée partition de variables. De plus, cette méthode exploite la structure du problème pour diminuer les difficultés liées à la résolution (Rahmaniani et al., 2017 ; Rahmaniani et al., 2020). Dans ce travail, nous allons effectivement exploiter la structure du modèle pour passer d'un problème non-linéaire en nombres entiers de grande taille vers un maître-problème linéaire en nombres entiers et des sous-problèmes non-linéaires en nombres entiers.

La décomposition de Benders est donc une utilisation de différentes méthodes de projection, linéarisation et de relaxation des contraintes plus étoffées. Généralement, cet algorithme est utilisé pour l'optimisation linéaire de nombres entiers, où les variables entières sont fixes et le reste du problème se résout de manière linéaire. De nos jours, son utilisation n'est plus limitée aux problèmes linéaires et en nombres entiers. En effet, il peut maintenant aussi être utilisé pour d'autres problèmes comme les non-linéaires (Rahmaniani et al., 2017 ; Rahmaniani et al., 2020).

Concernant son fonctionnement, la décomposition de Benders utilise les variables duales comme principal moyen de communication de l'information entre le maître-problème et les sous-problèmes. Premièrement, nous choisissons les variables considérées plus compliquées et nous les fixons. Pour cela, le modèle est divisé en minimum deux parties : des sous-problèmes et un maître-problème. Cela permet d'éliminer les variables compliquant la résolution et d'arriver plus rapidement à une solution faisable. La division des variables en différents problèmes est principalement utilisée pour exploiter la structure du problème original afin de simplifier la résolution (Hooker & Ottosson, 2003).

Premièrement, les sous-problèmes sont résolus et, les résultats trouvés vont être envoyés en tant que paramètres dans le maître-problème. Ensuite, après analyse des variables duales du maître-problème, les paramètres de coûts des sous-problèmes sont modifiés et remplacés par ces coûts marginaux qui proviennent des variables duales. Les sous-problèmes sont ensuite résolus et nous retournent de nouvelles solutions à utiliser comme paramètres dans le maître-problème. L'algorithme propose une relaxation du problème et de manière itérative alterne entre les sous-problèmes et le maître-problème, jusqu'à ce que la solution optimale du problème de départ soit trouvée (Rahmaniani et al., 2017 ; Hooker & Ottosson, 2003 ; Auray et al., 2015).

Comme dit précédemment, l'élément central est la division du problème. Toute la performance concernant les valeurs des variables duales de la décomposition de Benders va dépendre de la division choisie (Rahmaniani et al., 2020 ; Hooker & Ottosson, 2003).

4.2 Application au problème

Nous avons commencé par créer les sous-problèmes. Le but de ceux-ci est de déterminer le meilleur mélange, pour une tonne de charbons rentrés, satisfaisant toutes les contraintes de qualité du mélange. Pour que la plupart de nos contraintes soient linéaires, nous avons fait l'hypothèse que la quantité totale de charbons utilisée dans le mélange fait une tonne comme dit plus haut. Ainsi les contraintes (16) à (21) deviennent linéaires, comme vous pouvez le voir dans l'exemple ci-dessous :

$$\frac{\sum_c TeneurVolatile_c \times QCharbon_{u,t,c,m}}{\sum_c QCharbon_{u,t,c,m}} \geq MinVolatile \quad \forall m, u, t$$

Après avoir remplacé $\sum_c QCharbon_{u,t,c,m}$ par sa valeur d'une tonne, nous obtenons cette nouvelle équation :

$$\sum_c TeneurVolatile_c \times QCharbon_{u,t,c,m} \geq MinVolatile \quad \forall m, u, t$$

Nous avons d'abord mis les contraintes concernant I10 et I20 de côté, celles-ci restant non-linéaires (contraintes (27) à (33)), ainsi nous avons pu voir si notre modèle fonctionnait linéairement. Après avoir validé son fonctionnement et les réponses données, nous avons ajouté les contraintes non-linéaires au problème. Pour que le modèle non-linéaire puisse tourner correctement, nous avons dû initialiser notre variable $Q_{\text{Charbon } c}$ avec des valeurs non nulles. Pour cela, nous avons utilisé la réponse fournie par le modèle linéaire. Pour résoudre les sous-problèmes, nous utilisons une boucle sur les périodes et les usines, indicés respectivement par T et U . Les sous-problèmes seront ensuite résolus pour chaque période et usine, et détermineront le meilleur mélange.

Voici notre sous-problème :

- **Indices**

- $t \in T = \{1,2,3\}$ Les trois premiers mois de production
- $u \in U = \{1..5\}$ Les cinq usines de production
- $c \in C = \{1..16\}$ Les sortes de charbon
- $cb \in C1 = \{1, 2, 4, 5, 10, 11, 12, 14, 16\} \subseteq C$ Les sortes de charbon venant par bateau
- $ct \in C2 = \{3, 6, 7, 8, 9, 13, 15\} \subseteq C$ Les sortes de charbon venant par train
- $p \in P = \{1,2\}$ Les deux ports
- $a \in A = \{1..13\}$ Les différents acheteurs
- $lv \in C = \{1,2,3,4,14\} \subseteq C$ Les charbons de type low volume
- $mv \in C = \{5,13,15\} \subseteq C$ Les charbons de type mid volume
- $hv \in C = \{6,7,8,9,10,11,12,16\} \subseteq C$ Les charbons de type high volume
- $s \in C = \{12\} \subseteq C$ Le charbon de type soft
- $aus \in C = \{4\} \subseteq C$ Le charbon de type australien
- $cau \in A \cup U = \{1.3,2.1,3.1,4.2,4.3,5.3,6.1,6.2,7.2,8.2,9.1,10.2,11.3,12.4,13.5\} \subseteq A \cup U$ Liens entre les cokeries et les acheteurs qu'elles servent

- **Paramètres**

- $NbSoles_u$ Le nombre de soles doseuses à la cokerie u
- $MinSoles_u$ La proportion minimale de charbon présente dans le mélange à la cokerie u
- $MaxSoles_u$ La proportion maximale de charbon présente dans le mélange à la cokerie u
- $CoûtProd_{u,t}$ Le coût de production à la cokerie u durant la période t
- $TeneurCendres_c$ La teneur en cendres du charbon c
- $TeneurSoufre_c$ La teneur en soufre du charbon c
- $TeneurAlcali_c$ La teneur en alcali du charbon c
- $TeneurVolatile_c$ La teneur en matières volatiles du charbon c

- *TeneurInertes_c* La teneur en matières inertes du charbon c
- *PouvoirAgglu_c* Le pouvoir agglutinant des matières réactives du charbon c
- *FluiditéG_c* La fluidité maximale de Gieseler du charbon c
- *TauxOpportunité = 0,5%* Le taux d'opportunité pour calculer le coût de détention
- *TauxChange_t* Le taux de change de USD en € pour la période t
- *PrixCharbon_{c,t}* Le prix (USD et €) du charbon c au temps t
- *CoûtTransportBateau_{cb,p}* Le coût de transport (USD) en bateau du charbon cb jusqu'au port p
- *CoûtManutention_p* Le coût de manutention (€) au port p
- *CoûtTransportCokerie_{p,u}* Le coût de transport (€) du port p à la cokerie u
- *CoûtTransportTrain_{ct,u}* Le coût de transport (€) du charbon ct vers la cokerie u
- *MinVolatile = 24%* Le taux minimal en teneur volatile
- *MaxVolatile = 26%* Le taux maximal en teneur volatile
- *CendresMax_u* La teneur en cendres maximale acceptée dans la cokerie u, calculée en considérant le minimum en teneur en cendres demandé par les clients possibles de la cokerie u (le taux du client le plus exigeant)
- *SoufreMin_u* La teneur en soufre minimale pour la cokerie u, calculée en considérant le maximum en teneur en soufre demandé par les clients possibles de la cokerie u (le taux du client le plus exigeant)
- *SoufreMax_u* La teneur en soufre maximale pour la cokerie u, calculée en considérant le minimum en teneur en soufre demandé par les clients possibles de la cokerie u (le taux du client le plus exigeant)
- *AlcaliMax_u* La teneur en alcali maximale pour la cokerie u, calculée en considérant le minimum en teneur en alcali demandé par les clients possibles de la cokerie u (le taux du client le plus exigeant)
- *LVMin_u* La teneur minimale en charbon Low Volume à la cokerie u, calculée en considérant le minimum en teneur en charbon Low Volume demandé par les clients possibles de la cokerie u (le taux du client le plus exigeant)
- *LVMax_u* La teneur maximale en charbon Low Volume à la cokerie u, calculée en considérant le minimum en teneur en charbon Low Volume demandé par les clients possibles de la cokerie u (le taux du client le plus exigeant)
- *CoeffPassantCendres = 1,32* Le coefficient passant des cendres dans le mélange
- *CoeffPassantSoufre = 0,92* Le coefficient passant du soufre dans le mélange
- *CoeffPassantAlcali = 1,32* Le coefficient passant de l'alcali dans le mélange
- *MVMax = 0,25* La teneur maximale en charbon mid-volume dans le mélange
- *MVMin = 0,25* La teneur minimale en charbon mid-volume dans le mélange
- *SoftMax = 0,10* La teneur maximale en charbon soft dans le mélange
- *MaxCharbonAustralien = 30%* La teneur maximale en charbon australien dans le mélange

- **Variables**

- $QCharbon_{u,t,c}$ La quantité de charbon c utilisée dans la cokerie u durant la période t
- $BinCharbon_{u,t,c} = \{1 \text{ si charbon } c \text{ utilisé à la cokerie } u \text{ au temps } t \text{ } 0 \text{ sinon}$

- **Fonction d'objectif (à réaliser pour toute cokerie u à chaque temps t)**

$$\begin{aligned}
 \min. \text{ CoûtTotal} = & \\
 & \sum_{cb} \text{PrixCharbon}_{cb} \times QCharbon_{cb} \times \text{TauxChange} \\
 & + \sum_{ct} \text{PrixCharbon}_{ct} \times QCharbon_{ct} \\
 + \sum_{cb} & \text{Min}(p, \text{CoûtTransportBateau}_{cb,p}) \times QCharbon_{cb} \times \text{TauxChange} \\
 & + \sum_{p,cb} \text{Min}(p, \text{CoûtManutention}_p) \times QCharbon_{cb} \\
 + \sum_{cb} & \text{Min}(p, \text{CoûtTransportCokerie}_p) \times QCharbon_{cb} \\
 & + \sum_{ct} \text{CoûtTransportTrain}_{ct} \times QCharbon_{ct} \\
 & + \sum_c \text{CoûtProd} \times QCharbon_c
 \end{aligned}$$

- **Contraintes (à prendre en compte pour toutes les cokeries u à chaque temps t)**

- (1) Le nombre de charbon utilisé dans un mélange ne peut dépasser le nombre de soles doseuses disponibles dans chaque cokerie :

$$\sum_c BinCharbon_c \leq NbSoles$$

- (2) La somme des quantités de charbon entrées vaut 1 tonne:

$$\sum_c QCharbon_c = 1$$

- (3) La teneur en matières volatiles ne peut pas dépasser un certain pourcentage :

$$\sum_c \text{TeneurVolatile}_c \times QCharbon_c \leq \text{MaxVolatile}$$

- (4) La teneur en matières volatiles doit au moins atteindre un certain pourcentage :

$$\sum_c TeneurVolatile_c \times QCharbon_c \geq MinVolatile$$

- (5) La teneur en Cendres ne peut pas dépasser un certain pourcentage. Ce pourcentage correspond aux exigences minimales des clients susceptibles de venir à la cokerie :

$$\left(\sum_c TeneurCendres_c \times QCharbon_c \right) \times CoeffPassantCendres \leq CendresMax$$

- (6) La teneur en Soufre ne peut pas dépasser un certain pourcentage. Ce pourcentage correspond aux exigences minimales des clients susceptibles de venir à la cokerie :

$$\left(\sum_c TeneurSoufre_c \times QCharbon_c \right) \times CoeffPassantSoufre \leq SoufreMax$$

- (7) La teneur en Soufre doit au moins atteindre un certain pourcentage. Ce pourcentage est calculé selon l'exigence maximale des clients susceptibles de venir à la cokerie :

$$\left(\sum_c TeneurSoufre_c \times QCharbon_c \right) \times CoeffPassantSoufre \geq SoufreMin$$

- (8) La teneur en Alcali ne peut pas dépasser un certain pourcentage. Ce pourcentage correspond aux exigences minimales des clients susceptibles de venir à la cokerie :

$$\left(\sum_c TeneurAlcali_c \times QCharbon_c \right) \times CoeffPassantAlcali \leq AlcaliMax$$

- (9) La teneur en Low Volume ne peut pas dépasser un certain pourcentage. Ce pourcentage correspond aux exigences minimales des clients susceptibles de venir à la cokerie :

$$\sum_{c \in lv} QCharbon_c \leq LVMax$$

- (10) La teneur en Low Volume doit au moins atteindre un certain pourcentage. Ce pourcentage est calculé selon l'exigence maximale des clients susceptibles de venir à la cokerie :

$$\sum_{c \in lv} QCharbon_c \geq LVMin$$

- (11) La teneur en Mid Volume ne peut pas dépasser un certain pourcentage :

$$\sum_{c \in mv} QCharbon_c \leq MVMax$$

- (12) La teneur en Mid Volume doit au moins atteindre un certain pourcentage :

$$\sum_{c \in mv} QCharbon_c \geq MVMin$$

- (13) La teneur en Soft ne peut pas dépasser un certain pourcentage :

$$\sum_{c \in s} QCharbon_c \leq SoftMax$$

- (14) La teneur en charbon australien ne peut pas dépasser un certain pourcentage :

$$\sum_{c \in aus} QCharbon_c \leq MaxCharbonAustralien$$

- (15) La quantité de charbon entrée doit au moins atteindre la proportion minimale qu'une sole doseuse peut charger dans chaque cokerie :

$$MinSoles \times BinCharbon_c \leq QCharbon_c \quad \forall c$$

(16) La quantité de charbon entrée ne peut dépasser la proportion maximale qu'une sole doseuse peut charger dans chaque cokerie :

$$MaxSoles \times BinCharbon_c \geq QCharbon_c \quad \forall c$$

(17) Le paramètre I10 ne peut dépasser une certaine valeur maximale :

$$I10 \leq I10Max$$

(18) Le paramètre I20 doit dépasser une certaine valeur minimale :

$$I20 \geq I20Min$$

(19) Le paramètre TCIM est calculé en fonction de la teneur inerte des charbons présents dans ce mélange ainsi que de la quantité de chacun de ces charbons. Ainsi la teneur inerte d'un charbon a plus de poids si ce charbon est présent en grande quantité dans le mélange et inversement :

$$TICM = \frac{\sum_c TeneurInertes_c \times QCharbon_c}{\sum_c QCharbon_c}$$

(20) Le paramètre RCIM est calculé, comme donné dans le cas, c'est-à-dire en fonction du pouvoir agglutinant, ainsi qu'en prenant en compte la teneur non inerte, du charbon présent dans le mélange. Ainsi le pouvoir agglutinant d'un charbon a plus de poids si ce charbon est présent en grande quantité dans le mélange et inversement :

$$RCIM = \frac{\sum_c QCharbon_c \times (100 - TeneurInertes_c) \times PouvoirAgglu_c}{\sum_c QCharbon_c \times (100 - TeneurInertes_c)}$$

(21) Le paramètre LGFM est calculé, comme donné dans le cas, c'est-à-dire en fonction de la fluidité de Gieseler du charbon présent dans le mélange. Ainsi la fluidité de Gieseler d'un charbon a plus de poids si ce charbon est présent en grande quantité dans le mélange et inversement :

$$LGFM = \frac{\sum_c FluiditéG_c \times QCharbon_c}{\sum_c QCharbon_c}$$

(22) L'indice I20 est calculé comme donné dans le cas, c'est à dire dépendant de TCIM, RCIM et LGFM :

$$\begin{aligned}
 I20 = & -1,64 \times TICM + 209,1 \times RCIM + 58,96 \times LGFM + 0,0168 \times TICM^2 \\
 & - 110,8 \times RCIM^2 - 13,16 \times LGFM^2 - 108,66 \times RCIM \times LGFM \\
 & + 0,818 \times LGFM \times TICM + 1,015 \times LGFM^3 + 43,34 \times RCIM^2 \\
 & \times LGFM + 6,32 \times RCIM \times LGFM^2 - 0,02028 \times TICM^2 \\
 & \times LGFM + 0,663 \times TICM \times RCIM \times LGFM - 6,1
 \end{aligned}$$

(23) L'indice I20 est calculé comme donné dans le cas, c'est à dire dépendant de TCIM, RCIM et LGFM :

$$\begin{aligned}
 I10 = & 1,625 \times TICM - 200,7 \times RCIM - 61,9 \times LGFM - 0,0159 \times TICM^2 \\
 & + 105,8 \times RCIM^2 + 12,52 \times LGFM^2 + 114,83 \times RCIM \times LGFM \\
 & - 0,654 \times LGFM \times TICM - 0,938 \times LGFM^3 - 47,02 \times RCIM^2 \\
 & \times LGFM - 6,03 \times RCIM \times LGFM^2 + 0,01761 \times TICM^2 \\
 & \times LGFM - 0,734 \times TICM \times RCIM \times LGFM + 101
 \end{aligned}$$

Ensuite, nous avons écrit le maître-problème qui reprend toutes les autres contraintes, les contraintes de qualité ne sont plus reprises. L'objectif de celui-ci n'est pas de déterminer les mélanges car il les reçoit des sous-problèmes. Son but est de déterminer **le niveau d'utilisation des mélanges** de manière à satisfaire la demande des clients à chaque période à coût minimal. Pour trouver le niveau d'utilisation des mélanges, nous ajoutons, en paramètre du maître-problème, la proportion de charbons utilisée pour chaque mélange, cokerie et période de temps retournée par le sous-problème.

Voici notre maître-problème :

- **Indices**

- $t \in T = \{1,2,3\}$ Les trois premiers mois de production
- $u \in U = \{1..5\}$ Les cinq usines de production
- $c \in C = \{1..16\}$ Les sortes de charbon
- $cb \in C1 = \{1, 2, 4, 5, 10, 11, 12, 14, 16\} \subseteq C$ Les sortes de charbon venant par bateau
- $ct \in C2 = \{3, 6, 7, 8, 9, 13, 15\} \subseteq C$ Les sortes de charbon venant par train
- $p \in P = \{1,2\}$ Les deux ports
- $a \in A = \{1..13\}$ Les différents acheteurs

- $cau \in A \cup U = \{1.3, 2.1, 3.1, 4.2, 4.3, 5.3, 6.1, 6.2, 7.2, 8.2, 9.1, 10.2, 11.3, 12.4, 13.5\} \subseteq A \cup U$ Lien entre les cokeries et les acheteurs qu'elles servent
- $m \in M = \{1 \dots n\}$ Les mélanges, n étant le nombre de mélanges faisables mis à disposition

- **Paramètres**

- $CapacitéMax_u$ La capacité maximale journalière de la cokerie u
- $TauxMin_u$ Le taux minimal requis pour le fonctionnement de la cokerie u
- $Humidité_c$ La teneur en humidité du charbon c
- $TauxChange_t$ Le taux de change de USD en € pour la période t
- $CoûtManutention_p$ Le coût de manutention (€) au port p
- $Nbjour_t$ Le nombre de jours dans le mois (1 = 31, 2 = 28, 3 = 31)
- $CoûtProd_{u,t}$ Le coût de production à la cokerie u durant la période t
- $InitStock_{p,cb}$ Le stock initial du charbon cb au port p
- $LivraisonAttendueBateau_{cb,t}$ Livraisons prévues du charbon cb en période t par bateau
- $LivraisonAttendueTrain_{ct,t}$ Livraisons prévues du charbon ct en période t par train
- $PrixCharbon_{c,t}$ Le prix (USD et €) du charbon c au temps t
- $CoûtTransportBateau_{cb,p}$ Le coût de transport (USD) en bateau du charbon cb jusqu'au port p
- $CoûtTransportCokerie_{p,u}$ Le coût de transport (€) du port p à la cokerie u
- $CoûtTransportTrain_{ct,u}$ Le coût de transport (€) du charbon ct vers la cokerie u
- $Demande_{a,t}$ La demande du client a en période t
- $NbMélange_{u,t}$ Le nombre de mélanges pouvant être réalisé durant la période t à l'usine u
- $PropCharbon_{m,u,t,c}$ La proportion de charbon c dans la mélange m à l'usine u au temps t
- $TauxOpportunité = 0,5\%$ Le taux d'opportunité pour calculer le coût de détention

- **Variables**

- $QMélange_{u,t,m}$ La quantité totale de mélange formé m de la cokerie u au temps t
- $QProduit_{u,t,m}$ La quantité de charbon à la sortie du fourneau tenant compte de la perte d'humidité
- $QCommandéeBateau_{cb,t}$ La quantité de charbon cb commandée au temps t auprès du fournisseur
- $QCommandéeTrain_{ct,t}$ La quantité de charbon ct commandée au temps t auprès du fournisseur
- $CommandeRecuePort_{t,cb,p}$ La quantité de charbon cb reçue au port p au temps t
- $QStockPort_{cb,t,p}$ La quantité stockée de charbon cb au port p durant le temps t
- $QTransportPortCokerie_{cb,p,u,t}$ La quantité de charbon cb transportée du port p à la cokerie u au temps t

- $QTransportTrain_{ct,u,t}$ La quantité de charbon ct transportée par train jusqu'à la cokerie u au temps t
- $BinCharbon_{u,t,c,m} =$
 $\{1 \text{ si charbon } c \text{ utilisé pour le mélange } m \text{ à la cokerie } u \text{ au temps } t \text{ } 0 \text{ sinon}$
- $BinMelangeUtilise_{t,u,m} =$
 $\{1 \text{ si le mélange } m \text{ est bien utilisé à la cokerie } u \text{ au temps } t \text{ } 0 \text{ sinon}$
- $Qdemcok_{u,a,t}$ Quantité servie par l'usine u à l'acheteur a au temps t
- $QTrainUtilisé_{ct,u,t}$ Quantité utilisée du charbon ct à l'usine u au temps t
- $QStockCokerie_{ct,u,t}$ Quantité stockée du charbon ct à l'usine u au temps t

- **Objectif**

$$\begin{aligned}
 & \min. \text{ CoûtTotal} = \\
 & \sum_{p,t,cb} \text{PrixCharbon}_{cb,t} \times \text{CommandeRecuePort}_{t,cb,p} \times \text{TauxChange}_t \\
 & \quad + \sum_{u,t,ct} \text{PrixCharbon}_{ct,t} \times QTransportTrain_{ct,u,t} \\
 + & \sum_{p,t,cb} \text{CoûtTransportBateau}_{cb,p} \times \text{CommandeRecuePort}_{t,cb,p} \times \text{TauxChange}_t \\
 & \quad + \sum_{p,t,cb} \text{CoûtManutention}_p \times \text{CommandeRecuePort}_{t,cb,p} \\
 + & \sum_{p,t,cb} QStockPort_{cb,t,p} \times \text{TauxOpportunité} \times [\text{CoûtManutention}_p + \\
 & \quad (\text{CoûtTransportBateau}_{cb,p} + \text{PrixCharbon}_{cb,t}) \times \text{TauxChange}_t] \\
 + & \sum_{cb,p,u,t} \text{CoûtTransportCokerie}_{p,u} \times QTransportPortCokerie_{cb,p,u,t} \\
 & \quad + \sum_{ct,u,t} \text{CoûtTransportTrain}_{ct,u} \times QTransportTrain_{ct,u,t} \\
 & \quad + \sum_{u,t,c,m} \text{CoûtProd}_{u,t} \times \text{PropCharbon}_{m,u,t,c} \times QM lange_{u,t,m}
 \end{aligned}$$

- **Contraintes**

- (1) La quantité de charbon entrée dans le haut fourneau ne peut dépasser la capacité mensuelle maximale :

$$\sum_m QM lange_{u,t,m} \leq \text{CapacitéMax}_u \times \text{Nbjour}_t \quad \forall u, t$$

(2) La quantité de charbon entrée dans le haut fourneau doit au moins atteindre le taux de fonctionnement minimal requis :

$$\sum_m QMelange_{u,t,m} \geq TauxMin_u \times CapacitéMax_u \times Nbjour_t \quad \forall u, t$$

(3) & (4) La quantité de charbon stockée au port est égale au stock de la période précédente avec la quantité arrivant au port moins ce qui en sort pour être distribué aux cokeries :

$$QStockPort_{cb,t,p} = QStockPort_{cb,t-1,p} + CommandeRecuePort_{t,cb,p} - \sum_u QTransportPortCokerie_{cb,p,u,t} \quad \forall cb, t > 1, p$$

$$QStockPort_{cb,1,p} = InitStock_{p,cb} + CommandeRecuePort_{1,cb,p} - \sum_u QTransportPortCokerie_{cb,p,u,1} \quad \forall cb, p$$

(5) La quantité de produit fini (après mélange) vaut la quantité entrée de chaque charbon en fonction des proportions de celui-ci après la perte de matière due au taux d'humidité :

$$QProduit_{u,t,m} = \sum_c PropCharbon_{m,u,t,c} \times QMélange_{u,t,m} \times (1 - Humidité_c) \quad \forall u, t, m$$

(6) La quantité de charbon utilisée dans le mélange correspond à la quantité de charbon que la cokerie a reçue par train selon les proportions des charbons durant la même période :

$$QTrainUtilisé_{ct,u,t} = \sum_m PropCharbon_{m,u,t,c} \times QMélange_{u,t,m} \quad \forall u, t, ct$$

(7) & (8) La quantité de charbon stockée aux cokeries est égale au stock de la période précédente avec la quantité arrivant aux cokeries moins ce qui en sort pour être utilisé dans le mélange :

$$QStockCokerie_{ct,u,t} = QStockCokerie_{ct,u,t-1} + QTransportTrain_{ct,u,t} - QTrainUtilisé_{ct,u,t} \quad \forall ct, t > 1, u$$

$$QStockPort_{cb,1,p} = QTransportTrain_{ct,u,1} - QTrainUtilisé_{ct,u,1} \quad \forall ct, p$$

(9) La quantité de charbon utilisée dans le mélange selon les proportions correspond à la quantité de charbon que la cokerie a reçue des ports durant la même période :

$$\begin{aligned} & \sum_p QTransportPortCokerie_{cb,p,u,t} \\ &= \sum_m PropCharbon_{m,u,t,c} \times QMélange_{u,t,m} \quad \forall u, t, cb \end{aligned}$$

(10) La quantité de charbon, transportée en train jusque chaque cokerie, ne peut excéder la quantité commandée pour cette même période venant en train :

$$\begin{aligned} & \sum_u QTransportTrain_{ct,u,t} = \\ & LivraisonAttendueTrain_{ct,t} + QCommandéeTrain_{ct,t} \quad \forall t, ct \end{aligned}$$

(11) La quantité de charbon, transportée en bateau jusque chaque port, ne peut excéder la quantité commandée pour cette même période venant en bateau :

$$\begin{aligned} & \sum_p CommandeRecuePort_{t,cb,p} = \\ & LivraisonAttendueBateau_{cb,t} + QCommandéeBateau_{cb,t} \quad \forall t, cb \end{aligned}$$

(12) La quantité de produits finis d'une cokerie doit satisfaire la demande de chacun des clients que celle-ci doit servir :

$$\sum_m QProduit_{u,t,m} = \sum_a Qdemcok_{u,a,t} \quad \forall t, u$$

(13) La somme des quantités servies par chaque cokerie p à un client j doit au moins satisfaire sa demande :

$$Demande_{a,t} \leq \sum_{u \in ca_u} Qdemcok_{u,a,t} \quad \forall a, t$$

(14) On ne peut pas faire plus d'un certain nombre de mélanges par période à chaque cokerie :

$$\sum_m BinMelangeUtilise_{t,u,m} \leq NbMélange_{u,t} \quad \forall u, t$$

(15) La relation entre la binaire qui nous dit si un mélange est réalisé et la quantité produite de ce même mélange :

$$\begin{aligned} & BinMelangeUtilise_{t,u,m} \times CapacitéMax_u \times Nbjour_t \\ & \geq QMélange_{u,t,m} \quad \forall c, m, u, t \end{aligned}$$

(16) La relation entre la binaire qui nous dit si le charbon est utilisé dans le mélange et la quantité de charbon se trouvant dans ce même mélange :

$$\begin{aligned} & BinCharbon_{u,t,c,m} \times CapacitéMax_u \times Nbjour_t \\ & \geq PropCharbon_{m,u,t,c} \times QMélange_{u,t,m} \quad \forall u, t, c, m \end{aligned}$$

Dans le maître-problème nous avons deux contraintes de bilan disant que la quantité de charbons arrivant à la cokerie doit être égale à celle utilisée dans le mélange et ceci pour chaque charbon. Sur ces contraintes, nous allons analyser leurs prix cachés, c'est-à-dire leurs variables duales. Ceux-ci nous donnent l'effet sur l'objectif quand on ajoute une tonne de charbons. Si cette variable duale est positive, cela signifie qu'une tonne supplémentaire augmente le coût. Tandis que si elle est négative, le coût diminue quand nous recevons une tonne en plus de ce charbon. En sachant ceci, nous voulons pénaliser les charbons qui augmentent les coûts et favoriser ceux qui diminuent les coûts.

Cette pénalité ou avantage va être utilisé comme nouveau coût net à l'entrée de la cokerie du charbon dans nos sous-problèmes. Ceux-ci vont ensuite nous retourner un nouveau mélange optimal.

Ce nouveau mélange va être ajouté comme paramètre au maître-problème qui va déterminer le niveau d'utilisation de ce mélange.

Pour finir, nous arrêterons les itérations quand l'objectif du maître-problème se stabilisera. Il s'agit du critère d'arrêt de la boucle sur le maître-problème.

Pour résumer, la méthodologie principale est une boucle effectuant les itérations de résolution du maître-problème qui utilise en sous-routine une boucle de résolution des sous-problèmes comme représenté en figure 2. Les sous-problèmes envoyant les mélanges optimaux pour

chaque période T et chaque usine U au maître-problème. Le maître-problème renvoie par après l'effet sur l'objectif avec la variable duale aux sous-problèmes. Les deux modèles ne peuvent fonctionner sans la réponse de l'autre. Ils se parlent avec le minimum d'informations requises.

Toute la résolution de ce problème est encodée dans le logiciel GAMS qui est un logiciel de modélisation mathématique. Nous avons été aidées par différents manuels d'utilisateur afin de comprendre son langage. Les références de ces manuels peuvent être trouvées dans la bibliographie.

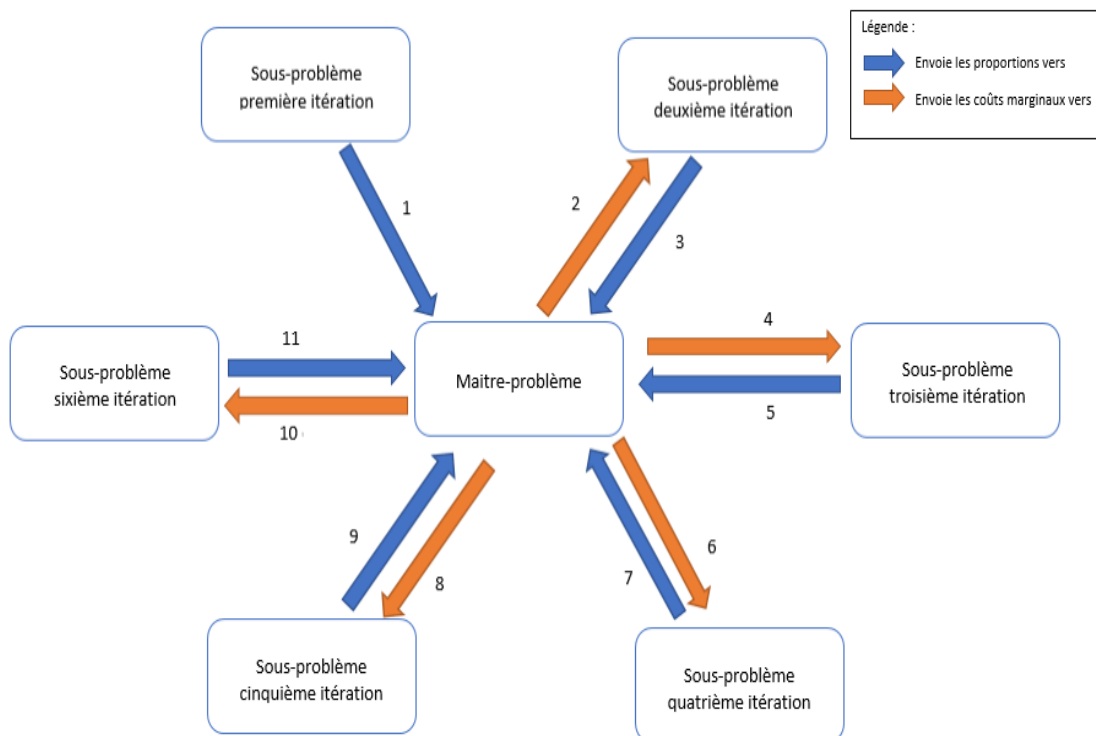


Figure 2: Schéma des boucles

5. Résultat du modèle et analyse de la solution

Nous allons débiter par une analyse assez brève des 5 premières itérations. La cinquième itération nous menant vers une réponse finale et respectant toutes nos différentes contraintes. Nous analyserons donc cette solution par la suite. Pour finir nous discuterons des différentes idées d'améliorations survenues durant cette analyse.

5.1 Les 5 premières itérations

Premièrement, les sous-problèmes nous donnent les proportions de chaque charbon présent dans le mélange optimal à chaque usine et à chaque période. Ces données sont trouvées dans la solution du sous-problème.

Ensuite, les proportions des charbons de ces mélanges sont ajoutées en tant que paramètres au maître-problème. Le maître-problème détermine le niveau d'utilisation de ces mélanges. Les réponses du maître-problème seront analysées afin de trouver les prix cachés des contraintes de flux écrites ci-dessous :

- (1) **Charbons venant par train** : La quantité de charbon utilisée dans le mélange correspond à la quantité de charbon que la cokerie a reçue par train à la même période :

$$Q_{TrainUtilisé_{ct,u,t}} = \sum_m PropCharbon_{m,u,t,c} \times Q_{Mélange_{u,t,m}} \quad \forall u, t, ct$$

- (2) **Charbons venant par bateau** : La quantité de charbon utilisée dans le mélange correspond à la quantité de charbon que la cokerie a reçue des ports à la même période :

$$\begin{aligned} & \sum_p Q_{TransportPortCokerie_{cb,p,u,t}} \\ &= \sum_m PropCharbon_{m,u,t,c} \times Q_{Mélange_{u,t,m}} \quad \forall u, t, cb \end{aligned}$$

Ces prix cachés s'interprètent comme des coûts marginaux, c'est-à-dire le coût d'une tonne de charbons qui arrive en plus à la cokerie. Ils seront ensuite rajoutés en paramètres, en coût de revient des charbons à l'entrée de la cokerie, au niveau des sous-problèmes afin de procéder à la deuxième itération. Celle-ci nous donnera un autre mélange.

L'objectif du maître-problème de la première itération s'élève à 85 343 762,20€.

Toutes ces étapes seront répétées pour les itérations suivantes. Les seules modifications réalisées sont que nous ajoutons un indice dans le nombre de mélanges disponibles et que notre contrainte (34), concernant le nombre maximal de mélanges autorisés durant un mois, devient active.

Le détail de la solution des sous-problèmes de la cinquième itération se trouve à l'Annexe 3.

Le détail de la solution du maître-problème à la cinquième itération se trouve à l'Annexe 4.

Nous pouvons observer une évolution positive de la fonction objective du maître-problème qui diminue au fur et à mesure de nos itérations, comme vous pouvez le voir dans le tableau 1 et la figure 3 ci-dessous :

	Itération 1	Itération 2	Itération 3	Itération 4	Itération 5
Objectif (€)	85 343 762.2	69 079 457.9	68 731 105.3	68 240 894.5	68 240 894.5

Tableau 1: Evolution de l'objectif

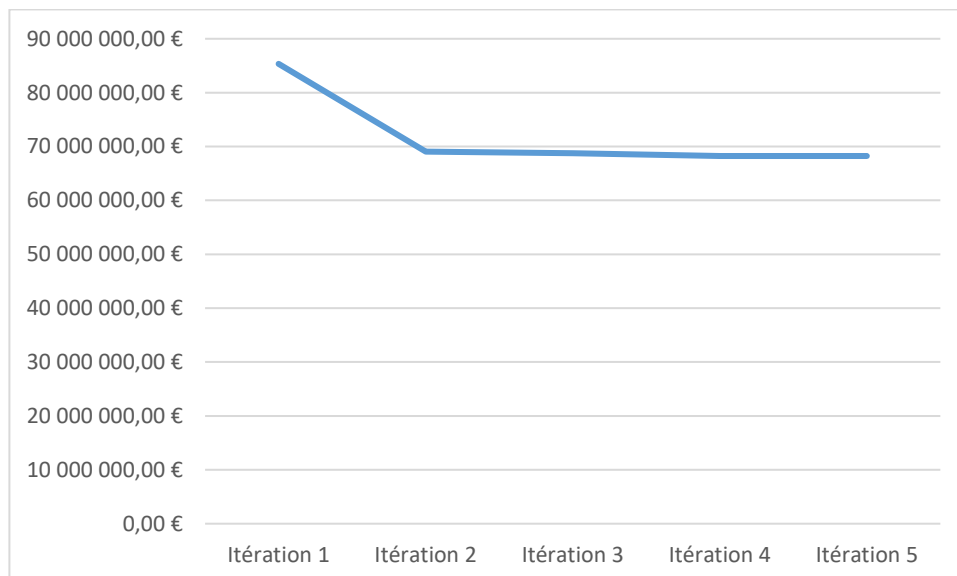


Figure 3: Evolution de la fonction objective

Nous nous sommes arrêtées à la cinquième itération pour différentes raisons. Premièrement, l'objectif est resté le même entre les itérations 4 et 5. Finalement, les coûts marginaux n'ont pas évolué et sont restés les mêmes, ce qui signifie que la sixième itération nous aurait donné la même réponse que la cinquième.

5.2 Analyse de la solution

Dans cette section, nous allons analyser plus en détails la réponse finale que nous avons obtenue. Avant de réaliser cette analyse, nous avons vérifié que chacune de nos contraintes étaient bien respectée. Vous pourrez trouver, en Annexe 4, le détail de la résolution du maître-problème.

L'objectif de la solution finale s'élève à 68 240 894,46€. Au niveau de la répartition des coûts, pour rappel le coût contient 4 termes que vous pouvez voir ci-dessous :

- (1) Le coût total des achats
- (2) Le coût total de transport
- (3) Le coût total de stockage
- (4) Le coût total de production

Coûts	Solution finale (€)	Pourcentage
Le coût total des achats	45 130 485	66.13%
Le coût total de transport	7 476 910.993	10.96%
Le coût total de stockage	96 417.98	0.14%
Le coût total de production	15 537 080.49	22.77%
Somme	68 240 894.46	100%

Tableau 2: Détails des différents coûts

Nous pouvons observer la répartition des coûts dans le graphique ci-dessous :

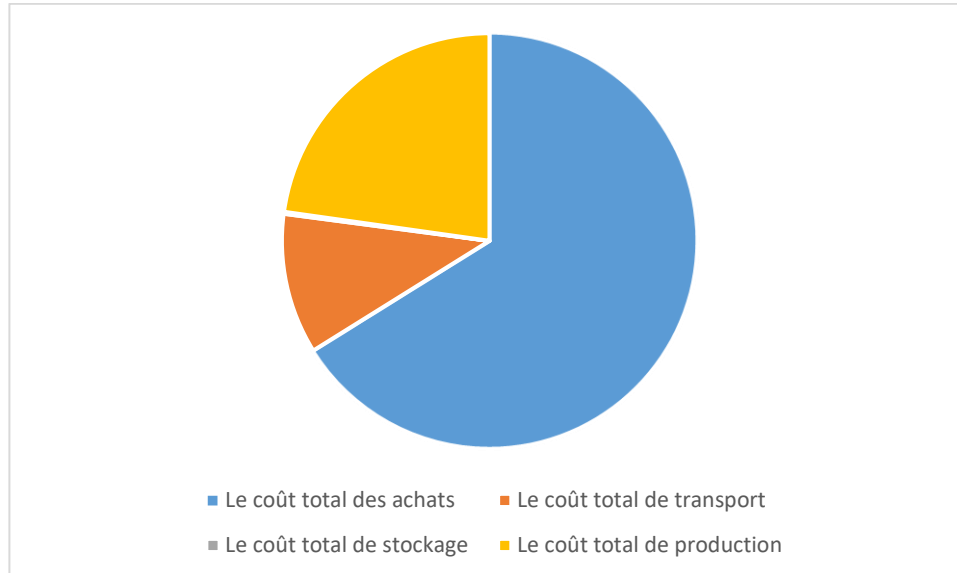


Figure 4: Répartition des différents coûts de notre objectif

On peut observer que les coûts principaux proviennent des coûts d'achats totaux des charbons. L'entreprise pourrait essayer de trouver d'autres fournisseurs moins chers. Un autre coût impactant l'objectif est le coût total de production par tonne de charbon. Pour améliorer ce dernier, il faudrait que l'entreprise investisse dans de nouveaux équipements plus efficaces, sinon on ne peut avoir aucun impact sur ces coûts. Des améliorations seront proposées dans la section 6.

Concernant le stock pour cette solution optimale, on peut voir ci-dessous un graphe représentant l'évolution au cours des périodes du stock des différents charbons dans les deux ports.

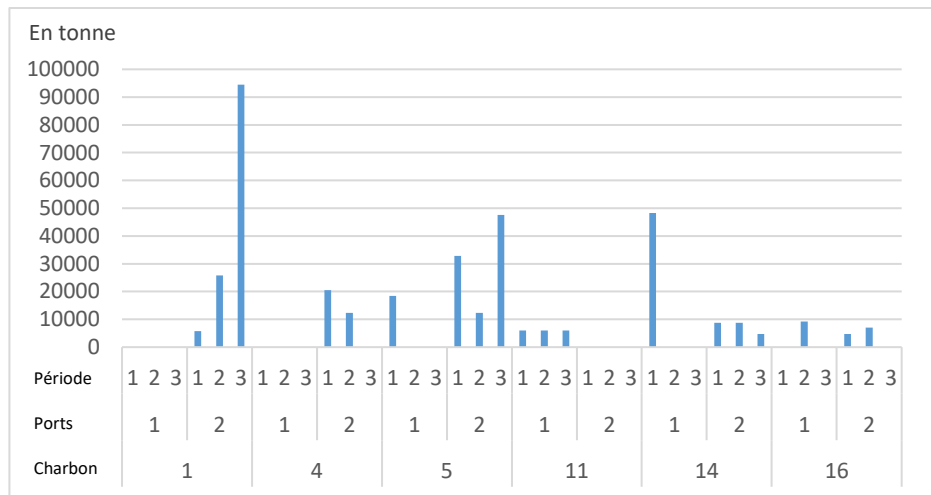


Figure 5: Evolution du stock des charbons aux ports pour chaque mois

On peut remarquer qu'il y a une certaine augmentation du stock en février et en mars pour le charbon 1 au port 2. Ceci peut être expliqué par la quantité de livraisons attendues par bateau, comme vous pouvez le voir ci-dessous, en février plus de 60 000 tonnes sont attendues et en mars plus de 100 000 tonnes. On peut donc supposer que les livraisons ont été stockées au port 2 pour le charbon 1, d'où l'importante augmentation. Les autres augmentations plus légères au niveau du stock sont également principalement dues à ces livraisons attendues.

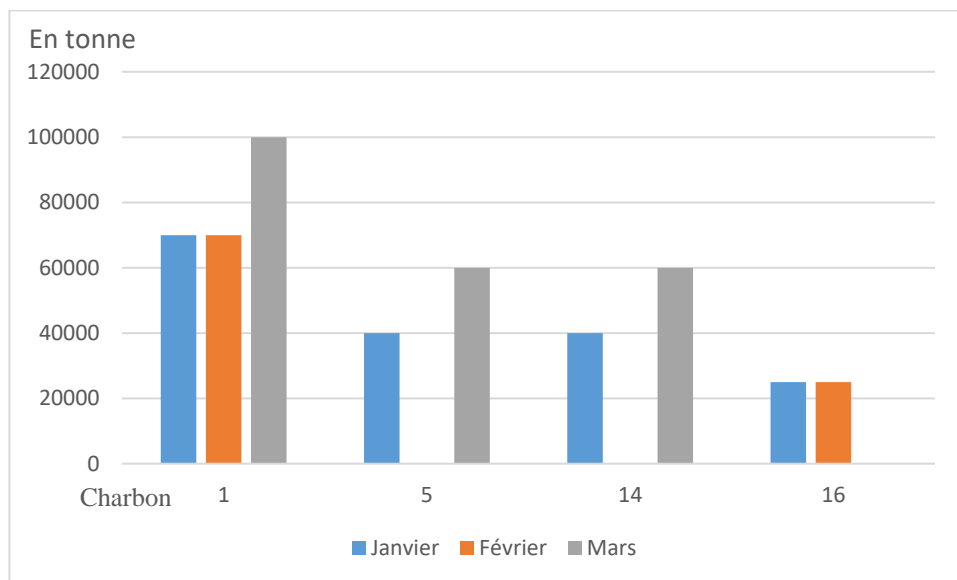


Figure 6: Livraison attendue de chaque charbon venant par bateau par mois

Après cela, nous allons passer à l'analyse des mélanges utilisés. Nous pouvons remarquer dans le tableau 3 que les cokeries ne produisent qu'un seul ou deux mélanges par mois. Ceci respecte bien notre contrainte (34) concernant le nombre maximal de mélanges pouvant être produits.

	Janvier	Février	Mars
Cokerie 1	Mélange 1	Mélange 1	Mélange 1
Cokerie 2	Mélange 2 et 3	Mélange 2 et 3	Mélange 1 et 3
Cokerie 3	Mélange 2	Mélange 2	Mélange 2 et 4
Cokerie 4	Mélange 2	Mélange 2	Mélange 2
Cokerie 5	Mélange 1 et 2	Mélange 1	Mélange 1

Tableau 3: Mélanges utilisés par chaque cokerie par mois

Ensuite, il est intéressant d'analyser le taux d'utilisation des soles doseuses pour ces mélanges. La figure 7 représente le nombre de charbons utilisés dans les mélanges par mois comparé au nombre de soles doseuses disponibles aux cokeries.

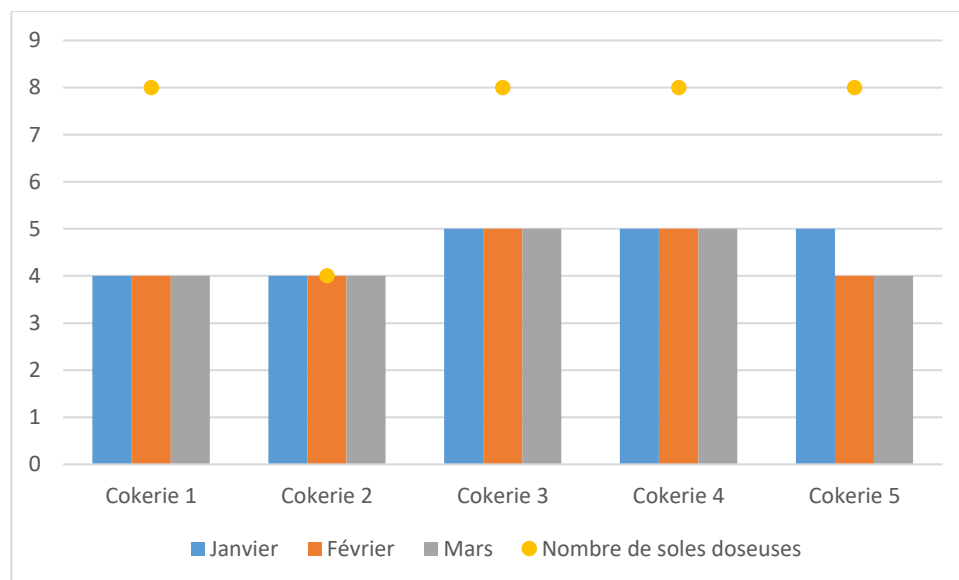


Figure 7: Taux d'utilisation des soles doseuses pour chaque cokerie par mois

Nous pouvons observer que la cokerie 2, la seule à ne disposer que de 4 soles doseuses, se trouve toujours à saturation du nombre de ses soles doseuses. De plus, les autres cokeries utilisent en moyenne 4 ou 5 soles doseuses sur toutes celles disponibles.

Nous pouvons donc dire qu'avoir 8 soles doseuses disponibles est confortable pour la production dans les cokeries. Malheureusement, les 4 soles doseuses à la cokerie 2 peuvent être considérées comme étant un nombre insuffisant à la production.

Maintenant, nous allons aborder les points concernant la production, c'est-à-dire la capacité des cokeries ainsi que le pourcentage de perte dû au processus réalisé dans le haut-fourneau.

Premièrement, nous allons comparer la capacité disponible de chaque cokerie mensuellement à la quantité de mélange entré dans le haut-fourneau.

Ci-dessous se trouve la comparaison de ces deux données.

		Cokerie 1	Cokerie 2	Cokerie 3	Cokerie 4	Cokerie 5
Janvier	Capacité	71300	88350	38750	108500	108500
	Utilisé	71300	55105.921	29062.5	63291.332	74243.536
Février	Capacité	64400	79800	35000	98000	98000
	Utilisé	64400	73716.55	28802.256	53058.952	74537.646
Mars	Capacité	71300	88350	38750	108500	108500
	Utilisé	61938.583	53010	29062.5	55919.688	77852.521

Tableau 4: Comparaison entre la capacité (en tonne) disponible et utilisée par mois

On peut voir qu'uniquement en janvier et février à la première cokerie, on utilise toute la capacité. Dans les autres cokeries, nous ne sommes jamais à pleine capacité. L'entreprise n'est donc pas contrainte par sa capacité dans la majorité des cas.

Concernant la perte de matières dans le haut-fourneau, les détails des données peuvent être trouvés en Annexe 5. Ces données ont été utiles pour la réalisation des graphiques représentant la différence entre la quantité entrée et sortie du haut-fourneau.

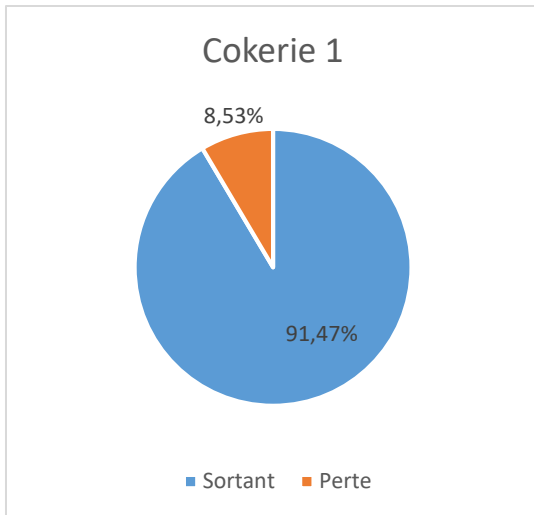


Figure 8: Pourcentage de perte à la cokerie 1

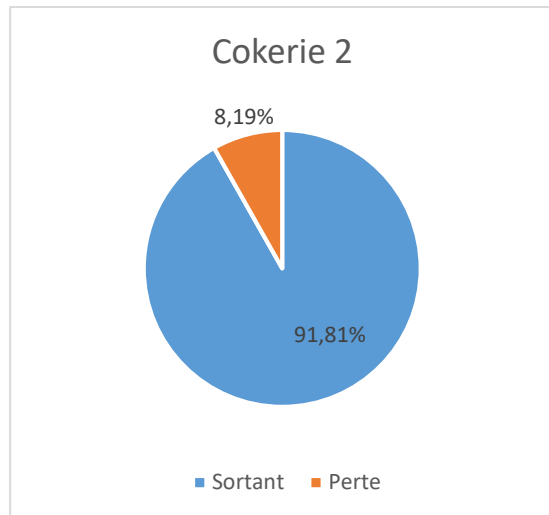


Figure 9: Pourcentage de perte à la cokerie 2

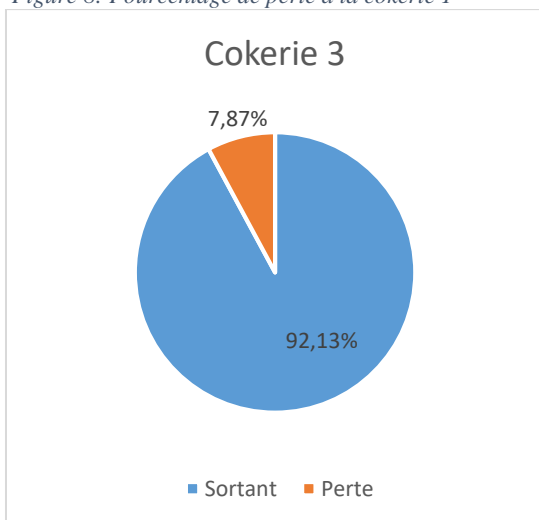


Figure 10: Pourcentage de perte à la cokerie 3

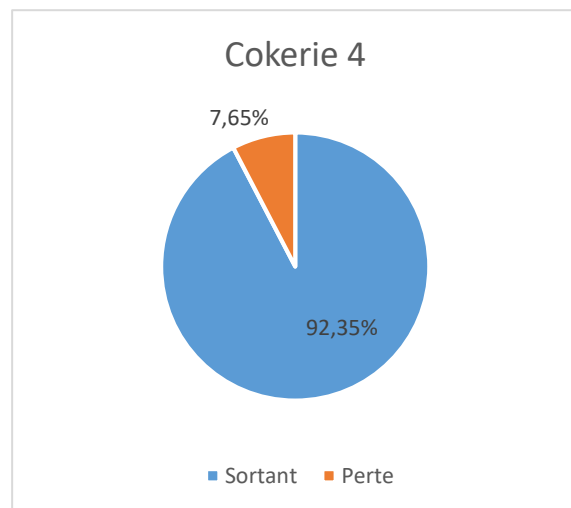


Figure 11: Pourcentage de perte à la cokerie 4

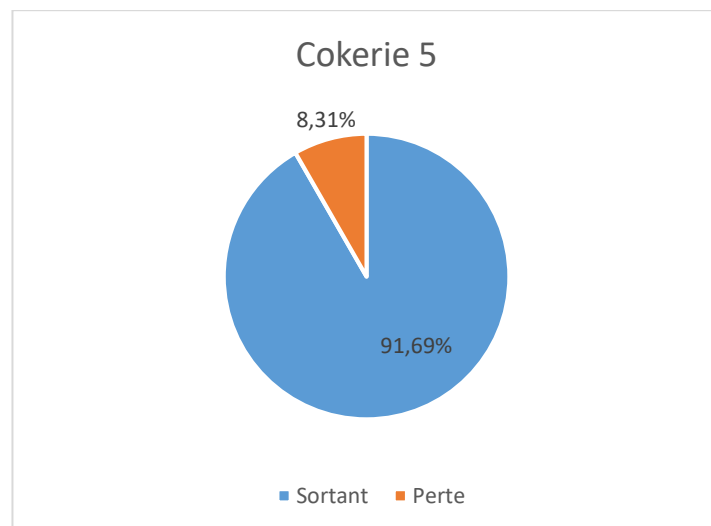


Figure 12: Pourcentage de perte à la cokerie 5

Grâce à ces graphiques, nous pouvons voir que la moyenne de perte de matières lors du processus dans le haut-fourneau est de 8%.

Enfin, concernant la demande, nous avons pu remarquer que les cokeries produisent exactement la demande des clients. Aucune cokerie n'est donc obligée de produire des quantités excédentaires pour satisfaire sa contrainte de taux minimum de fonctionnement valant 60% ou 75% pour la cokerie 3.

6. Conclusions

Pour conclure, nous nous sommes donc servis de la décomposition de Benders, afin de séparer notre modèle, ainsi que d'une relaxation linéaire, celle-ci nous permettant d'obtenir des solutions de départ non nulles dans notre modèle complet non-linéaire. Le modèle nous a donné une solution optimale après 5 itérations. Le coût total de celle-ci s'élève à 68 240 894,46€ pour un trimestre. Nous avons analysé cette solution afin de nous assurer tout d'abord qu'elle respecte toutes nos contraintes. Nous allons également grâce à cette analyse proposer de possibles améliorations ci-dessous. Nous finirons ces conclusions en mettant en avant les limitations du modèle.

Tout d'abord, en ce qui concerne l'analyse ainsi que les idées d'améliorations, nous avons pu premièrement observer que la cokerie 2 est la seule qui utilise toutes ses soles doseuses. Les autres cokeries disposent d'assez de soles doseuses pour réaliser leurs activités. Une amélioration ici pourrait être de fournir à la seconde cokerie plus de soles doseuses en réalisant un investissement. Cet investissement serait pertinent à condition que la diminution totale des coûts engendrés durant la période de vie des investissements couvre la totalité des investissements réalisés. Pour se faire, nous augmenterions le nombre de soles doseuses à la cokerie 2 et nous résoudrions le problème. Ainsi, nous pourrions observer la diminution du coût total sur un trimestre, qui sera remis sur la durée de vie des soles doseuses. Celui-ci sera par la suite comparé au coût d'investissement.

Ensuite, comme nous avons pu le voir, chaque client peut être servi par une ou deux cokeries, et celles-ci sont imposées par le modèle au sein des paramètres. Une amélioration dans ce cas-ci serait de laisser choisir le modèle, c'est-à-dire que les clients ne seraient pas reliés à la cokerie mais que le modèle pourrait choisir quelle cokerie livre quel client en fonction d'un coût de transport entre la cokerie et le client que nous rajouterions à notre modèle. Le modèle ayant pour but de minimiser ce coût, il choisirait lui-même quel client est desservi par quelle cokerie. Mais nous devons faire attention, en effet, en réalisant ceci, toutes les cokeries seraient contraintes sur le mélange par le même client le plus restrictif. Ce qui risquerait fortement d'augmenter les coûts.

Un autre point d'amélioration concerne les coûts. Lorsqu'on a observé précédemment la répartition des coûts, nous avons pu observer que le coût de production est un des coûts les plus importants. L'entreprise pourrait investir dans d'autres équipements qui permettront sur le long terme de diminuer ce coût de production. Il serait intéressant que l'entreprise analyse plus en détails ce qui est compris dans ce coût. De plus, le coût total des achats est le plus important. L'entreprise pourrait donc changer ses fournisseurs pour des fournisseurs offrant des prix plus attractifs pour l'achat des différents charbons.

De plus, nous avons pu observer que le charbon 1, le charbon 14 et le charbon 5 sont trois charbons stockés en grande quantité au port. Nous avons pu observer que cette quantité stockée est principalement due aux livraisons attendues par bateau. Nous pourrions donc faire plus attention lors des commandes en revoyant à la baisse cette quantité en analysant le stock aux différentes périodes afin de diminuer celle-ci et par conséquent diminuer le stock aux ports.

Pour finir, nous avons pu observer que, à part pour la première cokerie, les cokeries ne sont pas utilisées à pleine capacité. Il serait donc intéressant dans ce cas-ci de produire davantage, en acceptant peut-être d'autres clients.

En ce qui concerne les limitations auxquelles nous avons fait face, nous avons pu remarquer après l'analyse faite ci-dessus que certaines contraintes nous limitaient fortement lors de la résolution du modèle.

Tout d'abord, nous sommes limitées concernant la demande. Nous avons pu remarquer que la première cokerie utilise toute sa capacité disponible pour le mois de Janvier et de Février. Imaginons qu'il y ait une augmentation de la demande et que celle-ci ne sache pas servir entièrement la demande de tous ses clients. Nous trouvons cela dommage que les autres cokeries ne puissent pas aider à la production, si elles ont de la capacité de libre, juste par le fait qu'elles ne peuvent pas servir les clients attribués à cette première cokerie. Nous tenons à préciser, qu'il faudrait que la cokerie aidante respecte les mêmes critères de qualité sur ses mélanges.

Finalement, l'objectif trouvé peut aussi être considéré comme une limitation de notre analyse. Effectivement, nous pouvons considérer que l'objectif final n'est qu'une borne inférieure des coûts réellement engendrés. Ceci peut s'expliquer par le stock fictif que nous avons créé aux cokeries pour entreposer tous les charbons venant par train. Ce stock fictif engendrant des coûts

nuls. En réalité, celui-ci devrait nous générer des coûts mensuels pour chaque tonne de charbon entreposée. Nous pourrions ajouter le même pourcentage, que le coût de stockage aux ports, à au coût de stockage des charbons venant par train.

Bibliographie

- Auray, S., De Wolf, D., & Smeers, Y. (2015). Using Column Generation to solve a Coal Blending Problem. *Rairo-operations Research*, 49(1), 15-37.
- Brooke, A., Kendrick, D., & Meeraus, A. (1992). *GAMS: a user's guide, Release 2.25*.
- De Wolf, D. (2022a). *Introduction au langage GAMS*.
- De Wolf, D. (2022b). *Exploitation d'un groupe de cokeries*.
- Hooker, J. N., & Ottosson, G. (2003). Logic-based benders decomposition. *Mathematical Programming*, 96(1), 33-60. <https://doi.org/10.1007/s10107-003-0375-9>
- Rahmaniani, R., Ahmed, S., Crainic, T. G., Gendreau, M., & Rei, W. (2020). The benders dual decomposition method. *Operations Research*, 68(3), 878-895. <https://doi.org/10.1287/opre.2019.1892>
- Rahmaniani, R., Crainic, T. G., Gendreau, M., & Rei, W. (2017). The benders decomposition algorithm: A literature review. *European Journal of Operational Research*, 259(3), 801-817. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.12.005>

Annexes

Annexe 1: Ecriture des sous-problèmes sur GAMS

Sets

```

T les 3 premiers mois de production /1*3/
U les cinq usines de production /1*5/
C les sortes de charbon /1*16/
B(C) les sortes de charbon venant par bateau /1,2,4,5,10,11,12,14,16/
R(C) les sortes de charbon venant par train /3,6,7,8,9,13,15/
P les deux ports /1,2/
A les différents acheteurs /1*13/
LV(C) les charbons de type low volume /1,2,3,4,14/
MV(C) les charbons de type mid volume /5,13,15/
HV(C) les charbons de type high volume /6,7,8,9,10,11,12,16/
Soft(C) le charbon de type soft /12/
Aus(C) le charbon de type australien /4/
Client(A,U) lien entre les cokeries et les acheteurs qu'elles servent
/1.3,2.1,3.1,4.2,4.3,5.3,6.1,6.2,7.2,8.2,9.1,10.2,11.3,12.4,13.5/

;

```

Parameters

```

NBSOLES(U) nombre de soles doseuses à la cokerie u
/1 8
2 4
3 8
4 8
5 8 /

MINSOLES(U) la proportion minimale de charbon présente dans le mélange à
la cokerie u
/1 0.05
2 0.15
3 0.1
4 0.1
5 0.1 /

MAXSOLES(U) la proportion maximale de charbon présente dans le mélange à
la cokerie u
/1 1
2 0.35
3 1
4 1
5 1 /

```

TENEURCENDRES(C) le pourcentage en cendre du charbon c

/1 4.99
2 5.53
3 7.72
4 8.3
5 8.07
6 4.83
7 6.86
8 6.14
9 6.01
10 6.45
11 7.44
12 7.7
13 7
14 7.6
15 5.79
16 5.3 /

TENEURSOUFRE(C) le pourcentage en soufre du charbon c

/1 0.85
2 0.7
3 0.94
4 0.67
5 0.7
6 0.88
7 1.15
8 0.84
9 0.82
10 0.88
11 0.66
12 0.71
13 0.98
14 0.57
15 0.82
16 0.72 /

TENEURALCALI(C) le pourcentage en alcali du charbon c

/1 0.12
2 0.09
3 0.31
4 0.14
5 0.16
6 0.16
7 0.24
8 0.22
9 0.19
10 0.17
11 0.24

12 0.23
13 0.32
14 0.18
15 0.18
16 0.13 /

TENEURVOLATILE(C) le pourcentage en matières volatiles du charbon c

/1 17.89
2 17.48
3 22.71
4 21
5 23.6
6 30.19
7 29.9
8 31.39
9 32.75
10 33.08
11 27.43
12 32.09
13 25.1
14 19.3
15 24.39
16 33.5/

TENEURINERTE(C) le pourcentage en matières inertes du charbon c

/1 36.678
2 39.542
3 29.763
4 22.867
5 21.993
6 24.62
7 23.833
8 26.173
9 27.607
10 32.361
11 31.5
12 28.8
13 29.7
14 27.967
15 28.52
16 31.133 /

POUVOIRAGGLU(C) le pouvoir agglutinant des matières réactives du charbon c

/1 0.899
2 0.868
3 0.861
4 0.895
5 0.803

6 0.643
7 0.606
8 0.558
9 0.807
10 0.58
11 0.603
12 0.5
13 0.725
14 0.964
15 0.786
16 0.541 /

FLUIDITEG(C) la fluidité maximale de Gieseler du charbon c

/1 1.238
2 1.225
3 1.301
4 2.575
5 3.342
6 3.591
7 3.388
8 3.185
9 3.036
10 4.006
11 2.928
12 2.829
13 2.933
14 2.588
15 3.057
16 3.697 /

HUMIDITE(C) la teneur en humidité du charbon c

/1 6.63
2 7.77
3 10.15
4 8
5 9.47
6 6.8
7 7.54
8 8.66
9 6.29
10 7.2
11 6.45
12 6.81
13 8
14 10.14
15 8.99
16 7.9 /

TAUXCHANGE(T) le taux de change de USD en € pour la période T

/1 0.975
2 0.925
3 0.875/

COUTMANUTENTION (P) le coût de manutention (€) au port P

/1 3.3875
2 3.3875/

AMAXCENDRES(A) pourcentage de cendres maximal pour chaque acheteurs a

/1 10
2 10
3 10
4 10
5 10
6 9.5
7 9.5
8 10
9 10
10 10
11 10
12 9.5
13 9.5 /

AMINSOUFRE(A) pourcentage de soufre minimal pour chaque acheteurs a

/1 0
2 0
3 0
4 0
5 0
6 0.7
7 0.7
8 0
9 0
10 0
11 0
12 0.7
13 0.7 /

AMAXSOUFRE(A) pourcentage de soufre maximal pour chaque acheteurs a

/1 1
2 1
3 1
4 1
5 1
6 0.9
7 0.9
8 1
9 1
10 1

```
11 1
12 0.9
13 0.9 /
```

```
AMAXALCALI(A) pourcentage d'alcali maximal pour chaque acheteurs a
/1 0.3
2 0.3
3 0.3
4 0.3
5 0.3
6 0.3
7 0.3
8 0.3
9 0.3
10 0.3
11 0.3
12 0.3
13 0.3 /
```

```
AMINLV(A) pourcentage de low volume minimal pour chaque acheteurs a
/1 30
2 30
3 30
4 30
5 30
6 30
7 30
8 40
9 30
10 30
11 30
12 30
13 30 /
```

```
AMAXLV(A) pourcentage de low volume maximal pour chaque acheteurs a
/1 100
2 100
3 100
4 100
5 100
6 100
7 100
8 50
9 100
10 100
11 100
12 100
13 100 /
```

```
;
```

Parameter CENDRESMAX(U);
 CENDRESMAX(U) = **SMIN** (A\$Client(A,U), AMAXCENDRES(A));

Parameter SOUFREMIN(U);
 SOUFREMIN(U) = **SMAX** (A\$Client(A,U), AMINSOUFRE(A));

Parameter SOUFREMAX(U);
 SOUFREMAX(U) = **SMIN** (A\$Client(A,U), AMAXSOUFRE(A));

Parameter ALCALIMAX(U);
 ALCALIMAX(U) = **SMIN** (A\$Client(A,U), AMAXALCALI(A));

Parameter LVMIN(U);
 LVMIN(U) = **SMAX** (A\$Client(A,U), AMINLV(A));

Parameter LVMAX(U);
 LVMAX(U) = **SMIN** (A\$Client(A,U), AMAXLV(A));

Table COUTPROD (U,T) le coût de production à la cokerie U durant la période T

	1	2	3
1	11.45	11.4	11.35
2	18.175	18.1	18.025
3	38.15	38	37.85
4	24.125	24.025	23.925
5	11.3	11.25	11.2 ;

Table PRIXCHARBON (C,T) le prix (USD et €) du charbon c au temps T

	1	2	3
1	46.8	46.8	46.8
2	46.75	46.75	46.75
3	55.65	55.65	55.65
4	37.75	37.75	37.75
5	45.75	45.75	45.75
6	42.225	42.225	42.225
7	42.225	42.225	42.225
8	41.775	41.775	41.775
9	43.775	43.775	43.775
10	46.65	46.65	46.65
11	49.25	49.25	49.25
12	44.1	44.1	44.1
13	55.125	55.125	55.125
14	40	40	40

15 44.95 44.95 44.95
 16 46.8 46.8 46.8 ;

Table COUTTRANSPORTBATEAU (B,P) le coût de transport (USD) en bateau du charbon B(C) jusqu'au port P

	1	2
1	5.1	5.1
2	4.5	4.5
4	10.25	10.25
5	8.15	8.15
10	3.75	3.75
11	3.3	3.3
12	0	0
14	7.5	7.5
16	5.1	5.1 ;

Table COUTTRANSPORTCOKERIE(P,U) le coût de transport (€) du port P à la cokerie U

	1	2	3	4	5
1	4.4675	2.6375	99999	3.86	2.46
2	4.4675	3.25	0	3.86	4.105 ;

Table COUTTRANSPORTTRAIN (R,U) le coût de transport (€) du charbon R(C) vers la cokerie U

	1	2	3	4	5
3	9.155	7.39	99999	8.29	7.7475
6	4.67	4.2625	99999	6.08	2.31
7	4.67	4.2625	99999	6.08	2.31
8	4.67	4.2625	99999	6.08	2.31
9	9.155	7.39	99999	8.29	7.7475
13	9.155	7.39	99999	8.29	7.7475
15	4.67	4.2625	99999	6.08	2.31 ;

Scalar TAUXOPPORTUNITE le taux d'opportunité pour calculer le coût de détention /0.005/ ;

Scalar MINVOLATILE la teneur minimal en teneur volatile /0.24/ ;

Scalar MAXVOLATILE la teneur maximal en teneur volatile /0.26/;

Scalar COEFFPASSANTCENDRES le coefficient passant des cendres dans le mélange /1.32/;

Scalar COEFFPASSANTSOUFRE le coefficient passant du soufre dans le mélange /0.92/;

Scalar COEFFPASSANTALCALI le coefficient passant de l'alcali dans le mélange /1.32/;

Scalar MVMAX la teneur maximale en charbon mid-volume dans le mélange /0.25/;

Scalar MVMIN la teneur minimale en charbon mid-volume dans le mélange /0.25/;

Scalar SOFTMAX la teneur maximale en charbon soft dans le mélange /0.10/;

Scalar MAXCHARBONAUSTRA LIEN la teneur maximale en charbon australien dans le mélange / 0.3/;
Scalar I10MAX Limite supérieur pour I10 /23/;
Scalar I20Min Limite inférieur pour I20 /76.5/;

PARAMETER PRIX(C) ;
SCALAR CHANGE;
PARAMETER CoutTrans1(P);
PARAMETER CoutTransTrain(C);
SCALAR CoutP;
PARAMETER XCharbon(U,T,C);
PARAMETER NBSOLESU;
PARAMETER CENDRESMAXU;
PARAMETER SOUFREMAXU;
PARAMETER SOUFREMINU;
PARAMETER ALCALIMAXU;
PARAMETER LVMAXU;
PARAMETER LVMINU;
PARAMETER MAXSOLESU;
PARAMETER MINSOLESU;

Variables

BINCHARBON (C) binaire prenant la valeur de 1 si le charbon C est utilisé à la cokerie U au temps T et 0 sinon
COUT Le coût total à minimiser (pour l'objectif)
LGFM
TCIM
RCIM
I10
I20;

Variable QCHARBON(C)

/
1.1 0.1
2.1 0.1
3.1 0.1
4.1 0.1
5.1 0.1
6.1 0.1
7.1 0.1
8.1 0.1
9.1 0.1
10.1 0.1
11.1 0.1
12.1 0.1
13.1 0.1
14.1 0.1
15.1 0.1
16.1 0.1 /
;

Positive Variables

LGFM
 TCIM
 RCIM
 I10
 I20

;

Binary Variables

BINCHARBON (C)

;

Free Variable

COUT

;

Equations

COUTTOTAL définit la fonction objectif

DISPOSOLES le nombre de charbon utilisé dans un mélange ne peut dépasser le nombre de soles doseuses disponibles dans chaque cokerie

FLUX1 La somme des quantités de charbon entrées vaut la quantité totale de mélange dans le fourneau

MAXTENEURVOLATILE La teneur en matières volatiles ne peut pas dépasser un certain pourcentage

MINTENEURVOLATILE La teneur en matières volatiles doit au moins atteindre un certain pourcentage

MAXTENEURCENDRE La teneur en cendres ne peut pas dépasser un certain pourcentage. Ce pourcentage correspond aux exigences minimums des clients susceptibles de venir à la cokerie

MAXTENEURSOUFRE La teneur en soufre ne peut pas dépasser un certain pourcentage. Ce pourcentage correspond aux exigences minimums des clients susceptibles de venir à la cokerie

MINTENEURSOUFRE La teneur en soufre doit au moins atteindre un certain pourcentage. Ce pourcentage correspond à l'exigence maximale des clients susceptibles de venir à la cokerie

MAXTENEURALCALI La teneur en alcali ne peut pas dépasser un certain pourcentage. Ce pourcentage correspond aux exigences minimums des clients susceptibles de venir à la cokerie

MAXLOWVOLUME La teneur en Low Volume ne peut pas dépasser un certain pourcentage. Ce pourcentage correspond aux exigences minimums des clients susceptibles de venir à la cokerie

MINLOWVOLUME La teneur en Low Volume doit au moins atteindre un certain pourcentage. Ce pourcentage correspond à l'exigence maximale des clients susceptibles de venir à la cokerie

MAXMIDVOLUME La teneur en Mid Volume ne peut pas dépasser un certain pourcentage.

MINMIDVOLUME La teneur en Mid Volume doit au moins atteindre un certain pourcentage.

MAXTENEURSOFT La teneur en soft ne peut pas dépasser un certain pourcentage

TENEURAUSTRALIEN La teneur en charbon australien ne peut pas dépasser un certain pourcentage

BINAIRECUTILISE(C) Lien entre la binaire et la quantité entrante maximale dans la cokerie

BINCUTILISE(C) Lien entre la binaire et la quantité entrante minimale dans la cokerie

RCIME pouvoir agglutinant des matières réactives du mélange

LGFME fluidité maximale Gieseler du mélange

TCIME teneur en inerte du mélange

I10E

I20E

I10MAXE

I20MINE

;

COUTTOTAL..COUT =E= $\text{SUM}(\text{C}\$B(C), \text{Prix}(C)*\text{QCHARBON}(C)*\text{Change})$
 + $\text{SUM}(\text{C}\$R(C), \text{Prix}(C)*\text{QCHARBON}(C))$
 + $\text{SUM}(B, \text{SMIN}(P, \text{COUTTRANSPORTBATEAU}(B,P)) * \text{QCHARBON}(B) * \text{Change})$
 + $\text{SUM}(\text{C}\$B(C), \text{SMIN}(P, \text{COUTMANUTENTION}(P)) * \text{QCHARBON}(C))$
 + $\text{SUM}(\text{C}\$B(C), \text{SMIN}(P, \text{CoutTrans1}(P)) * \text{QCHARBON}(C))$
 + $\text{SUM}(R, \text{CoutTransTrain}(R) * \text{QCHARBON}(R))$
 + $\text{SUM}(C, \text{CoutP} * \text{QCHARBON}(C)) ;$

DISPOSOLES.. $\text{SUM}(C, \text{BINCHARBON}(C)) =1= \text{NBSOLESU};$

FLUX1.. $\text{SUM}(C, \text{QCHARBON}(C)) =E= 1;$

MAXTENEURVOLATILE.. $(\text{SUM}((C), \text{TENEURVOLATILE}(C)*\text{QCHARBON}(C))) =1= \text{MAXVOLATILE} * 100;$

MINTENEURVOLATILE.. $(\text{SUM}((C), \text{TENEURVOLATILE}(C)*\text{QCHARBON}(C))) =g= \text{MINVOLATILE} * 100;$

MAXTENEURCENDRE.. $\text{SUM}(C, \text{COEFFPASSANTCENDRES} * \text{TENEURCENDRES}(C) * \text{QCHARBON}(C)) =1= \text{CENDRESMAXU};$

MAXTENEURSOUFRE.. $\text{SUM}(C, \text{COEFFPASSANTSOUFRE} * \text{TENEURSOUFRE}(C) * \text{QCHARBON}(C)) =1= \text{SOUFREMAXU};$

MINTENEURSOUFRE.. $\text{SUM}(C, \text{COEFFPASSANTSOUFRE} * \text{TENEURSOUFRE}(C) * \text{QCHARBON}(C)) =g= \text{SOUFREMINU};$

MAXTENEURALCALI.. $\text{SUM}(C, \text{COEFFPASSANTALCALI} * \text{TENEURALCALI}(C) * \text{QCHARBON}(C)) =1= \text{ALCALIMAXU};$

MAXLOWVOLUME.. $\text{SUM}(\text{C}\$LV(C), \text{QCHARBON}(C)) =1= \text{LVMAXU}/100;$

MINLOWVOLUME.. $\text{SUM}(\text{C}\$LV(C), \text{QCHARBON}(C)) =g= \text{LVMINU}/100;$

```

MAXMIDVOLUME..(SUM(MV(C),QCHARBON(C))) =l= MVMAX;

MINMIDVOLUME..(SUM(MV(C),QCHARBON(C))) =g= MVMIN;

MAXTENEURSOFT..(SUM(Soft(C),QCHARBON(C))) =l= SOFTMAX;

TENEURAUSTRALIEN..(SUM(Aus(C), QCHARBON(C))) =l= MAXCHARBONAUSTRALIEN;

BINAIRECUTILISE(C)..QCHARBON(C) =l= BINCHARBON (C)*MAXSOLESU;

BINCUTILISE(C)..QCHARBON(C) =g= BINCHARBON (C)*MINSOLESU;

TCIME..TCIM=E= SUM((C),TENEURINERTE(C)*QCHARBON(C));

RCIME..RCIM =E= (SUM((C),QCHARBON(C)*(100-TENEURINERTE(C))*POUVOI-
RAGGLU(C)))/(SUM((C),QCHARBON(C)*(100-TENEURINERTE(C))));

LGFME..LGFM =E= SUM((C),FLUIDITEG(C)*QCHARBON(C));

I20E..I20 =E= -1.64*TCIM + 209.1*RCIM + 58.96*LGFM + 0.0168*TCIM*TCIM -
110.8*RCIM*RCIM
                -13.16*LGFM*LGFM -108.66*RCIM*LGFM +0.818*LGFM*TCIM
+1.015*LGFM*LGFM*LGFM +43.34*RCIM*RCIM*LGFM
                +6.32*RCIM*LGFM*LGFM -0.02028*TCIM*TCIM*LGFM
+0.663*TCIM*RCIM*LGFM-6.1 ;

I10E..I10 =E= 1.625*TCIM -200.7*RCIM -61.9*LGFM -0.0159*TCIM*TCIM +
105.8*RCIM*RCIM +12.52*LGFM*LGFM
                +114.83*RCIM*LGFM -0.654*TCIM*LGFM -0.938*LGFM*LGFM*LGFM-
47.02*RCIM*RCIM*LGFM
                -6.03*RCIM*LGFM*LGFM +0.01761*TCIM*TCIM*LGFM -
0.734*TCIM*RCIM*LGFM +101;

I10MAXE..I10 =l= I10MAX;

I20MINE..I20=g= I20Min;

```

```

Model SousProbleme /ALL/;

```

```

loop (U,
  loop (T,
    Prix(C)= PRIXCHARBON (C,T);
    Change = TAUXCHANGE(T);
    CoutTrans1(P) = COUTTRANSPORTCOKERIE(P,U);
    CoutTransTrain(R) = COUTTRANSPORTTRAIN (R,U);
    CoutP = COUTPROD (U,T);
  )
)

```

```

NBSOLESU = NBSOLES(U);
CENDRESMAXU= CENDRESMAX(U);
SOUFREMAXU=SOUFREMAX(U);
SOUFREMINU=SOUFREMIN(U);
ALCALIMAXU=ALCALIMAX(U);
LVMAXU = LVMAX(U);
LVMINU = LVMIN(U);
MAXSOLESU = MAXSOLES(U);
MINSOLESU = MINSOLES(U);
solve SousProbleme using MINLP minimizing COUT;
DISPLAY QCHARBON.L;
)
)
;
```

Annexe 2 : Ecriture du maître-problème sur GAMS

Sets

```

T les 3 premiers mois de production /1*3/
U les cinq usines de production /1*5/
C les sortes de charbon /1*16/
B(C) les sortes de charbon venant par bateau /1,2,4,5,10,11,12,14,16/
R(C) les sortes de charbon venant par train /3,6,7,8,9,13,15/
P les deux ports /1,2/
A les différents acheteurs /1*13/
Client(A,U) lien entre les cokeries et les acheteurs qu'elles servent
/1.3,2.1,3.1,4.2,4.3,5.3,6.1,6.2,7.2,8.2,9.1,10.2,11.3,12.4,13.5/
M Les mélanges X étant le nombre de mélanges faisables mit a dispo
/1,2,3,4,5/ ;
* Cet indice est a modifié selon le nombre de mélanges
```

Parameters

```

CAPACITEMAX(U) capacité maximale journalière de la cokerie u
/ 1 2300
  2 2850
  3 1250
  4 3500
  5 3500 /
```

```

TAUXMIN(U) taux minimal requis pour le fonctionnement de la cokerie u
/ 1 0.6
  2 0.6
  3 0.75
  4 0.6
  5 0.6 /
```

```

HUMIDITE(C) la teneur en humidité du charbon c
/1 0.0663
 2 0.0777
```

3 0.1015
 4 0.08
 5 0.0947
 6 0.068
 7 0.0754
 8 0.0866
 9 0.0629
 10 0.072
 11 0.0645
 12 0.0681
 13 0.08
 14 0.1014
 15 0.0899
 16 0.079 /

TAUXCHANGE(T) le taux de change de USD en € pour la période T
 /1 0.975
 2 0.925
 3 0.875/

COUTMANUTENTION (P) le coût de manutention (€) au port P
 /1 3.3875
 2 3.3875/

NBJOUR(T) le nombre de jours dans le mois
 /1 31
 2 28
 3 31/

;

Table COUTPROD (U,T) le coût de production à la cokerie U durant la période T

	1	2	3
1	11.45	11.4	11.35
2	18.175	18.1	18.025
3	38.15	38	37.85
4	24.125	24.025	23.925
5	11.3	11.25	11.2 ;

Table INITSTOCK(B,P) le stock initial du charbon B(C) au port P

	1	2
1	558	7620
2	0	0
4	0	36655
5	42760	22570
10	0	0

11 5950 0
12 0 0
14 43505 0
16 0 6450 ;

Table LIVRAISONATTENDUEBATEAU(B,T) livraison prévue du charbon B(C) en période T par bateau

	1	2	3
1	70000	70000	100000
14	40000	0	60000
5	40000	0	60000
16	25000	25000	0 ;

Table LIVRAISONATTENDUETRAIN(R,T) livraison prévue du charbon R(C) en période T par train

	1	2	3
15	42400	42400	42400
6	49600	49600	49600
8	10000	10000	10000
7	14800	14800	14800
3	26000	26000	26000
13	16000	16000	16000
9	20000	20000	20000 ;

Table PRIXCHARBON (C,T) le prix (USD et €) du charbon c au temps T

	1	2	3
1	46.8	46.8	46.8
2	46.75	46.75	46.75
3	55.65	55.65	55.65
4	37.75	37.75	37.75
5	45.75	45.75	45.75
6	42.225	42.225	42.225
7	42.225	42.225	42.225
8	41.775	41.775	41.775
9	43.775	43.775	43.775
10	46.65	46.65	46.65
11	49.25	49.25	49.25
12	44.1	44.1	44.1
13	55.125	55.125	55.125
14	40	40	40
15	44.95	44.95	44.95
16	46.8	46.8	46.8 ;

Table COUTTRANSPORTBATEAU (B,P) le coût de transport (USD) en bateau du charbon B(C) jusqu'au port P

	1	2
1	5.1	5.1
2	4.5	4.5

4	10.25	10.25
5	8.15	8.15
10	3.75	3.75
11	3.3	3.3
12	0	0
14	7.5	7.5
16	5.1	5.1 ;

Table COUTTRANSPORTCOKERIE(P,U) le coût de transport (€) du port P à la cokerie U

	1	2	3	4	5
1	4.4675	2.6375	99999	3.86	2.46
2	4.4675	3.25	0	3.86	4.105 ;

Table COUTTRANSPORTTRAIN (R,U) le coût de transport (€) du charbon R(C) vers la cokerie U

	1	2	3	4	5
3	9.155	7.39	0	8.29	7.7475
6	4.67	4.2625	0	6.08	2.31
7	4.67	4.2625	0	6.08	2.31
8	4.67	4.2625	0	6.08	2.31
9	9.155	7.39	0	8.29	7.7475
13	9.155	7.39	0	8.29	7.7475
15	4.67	4.2625	0	6.08	2.31 ;

Table DEMANDE(A,T) la demande du client A en période T

	1	2	3
1	11500	12600	12600
2	0	4000	4000
3	45000	45000	45000
4	7000	8000	8000
5	2000	2000	2000
6	16500	24800	14400
7	26700	19400	14800
8	0	3500	0
9	6000	6000	5000
10	16000	16000	14000
11	12000	12000	12000
12	58452	49002	51644
13	68516	68132	71162 ;

Table NBMELANGE(U,T) le nombre de mélanges pouvant être réalisé durant la période T à la cokerie U

	1	2	3
1	2	2	2
2	2	2	2
3	2	2	2
4	2	2	2
5	2	2	2 ;

Table PROPCHARBON(M,U,T,C) La proportion de charbon c dans le mélange m de l'usine u au temps t

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15	16			
1.1.1	0	0	0	0	0	0	0.356	0.05	0
0	0	0	0	0.344	0.25	0			
1.1.2	0	0	0	0	0	0	0.356	0.05	0
0	0	0	0	0.344	0.25	0			
1.1.3	0	0	0	0	0	0	0.356	0.05	0
0	0	0	0	0.344	0.25	0			
1.2.1	0	0	0	0	0.199	0	0.35	0	0
0	0	0	0	0.201	0.25	0			
1.2.2	0	0	0	0	0.199	0	0.35	0	0
0	0	0	0	0.201	0.25	0			
1.2.3	0	0	0	0	0.15	0	0	0.338	0
0	0	0	0	0.262	0.25	0			
1.3.1	0	0	0	0	0	0.25	0	0	0
0.17	0	0.1	0	0.48	0	0			
1.3.2	0	0	0	0	0	0.25	0	0	0
0.17	0	0.1	0	0.48	0	0			
1.3.3	0	0	0	0	0	0.25	0	0	0
0.17	0	0.1	0	0.48	0	0			
1.4.1	0	0	0	0	0	0	0.299	0.1	0
0	0	0	0	0.351	0.25	0			
1.4.2	0	0	0	0	0	0	0.299	0.1	0
0	0	0	0	0.351	0.25	0			
1.4.3	0	0	0	0	0	0	0.126	0.13	0
0	0	0.1	0	0.394	0.25	0			
1.5.1	0	0	0	0	0	0	0.299	0.1	0
0	0	0	0	0.351	0.25	0			
1.5.2	0	0	0	0	0	0	0.299	0.1	0
0	0	0	0	0.351	0.25	0			
1.5.3	0	0	0	0	0	0	0.299	0.1	0
0	0	0	0	0.351	0.25	0			
2.1.1	0.1087	0	0	0.4938	0	0.25	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0.1475			
2.1.2	0.1087	0	0	0.4938	0	0.25	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0.1475			
2.1.3	0.1087	0	0	0.4938	0	0.25	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0.1475			
2.2.1	0.2993	0	0	0.2007	0	0.25	0	0	0
0.25	0	0	0	0	0	0	0		
2.2.2	0.2993	0	0	0.2007	0	0.25	0	0	0
0.25	0	0	0	0	0	0	0		
2.2.3	0.2993	0	0	0.2007	0	0.25	0	0	0
0.25	0	0	0	0	0	0	0		
2.3.1	0.3642	0	0	0	0.1	0.25	0	0	0
0.1204	0	0	0	0	0	0	0.1654		

2.3.2	0.3642	0		0	0.1	0.25	0	0	0
0.1204	0	0	0	0	0	0	0	0.1654	
2.3.3	0.3642	0		0	0.1	0.25	0	0	0
0.1204	0	0	0	0	0	0	0	0.1654	
2.4.1	0.3642	0		0	0.1	0.25	0	0	0
0.1204	0	0	0	0	0	0	0	0.1654	
2.4.2	0.3642	0		0	0.1	0.25	0	0	0
0.1204	0	0	0	0	0	0	0	0.1654	
2.4.3	0.3642	0		0	0.1	0.25	0	0	0
0.1204	0	0	0	0	0	0	0	0.1654	
2.5.1	0.3642	0		0	0.1	0.25	0	0	0
0.1204	0	0	0	0	0	0	0	0.1654	
2.5.2	0.3642	0		0	0.1	0.25	0	0	0
0.1204	0	0	0	0	0	0	0	0.1654	
2.5.3	0.3642	0		0	0.1	0.25	0	0	0
0.1204	0	0	0	0	0	0	0	0.1654	
3.1.1	0	0.0513	0	0.3	0	0	0	0	0
0.2554	0	0.0933	0.05	0.25	0	0	0	0	
3.1.2	0	0.0513	0	0.3	0	0	0	0	0
0.2554	0	0.0933	0.05	0.25	0	0	0	0	
3.1.3	0	0.0513	0	0.3	0	0	0	0	0
0.2554	0	0.0933	0.05	0.25	0	0	0	0	
3.2.1	0.2463	0	0.2022	0	0.25	0.3015	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0			
3.2.2	0.2463	0	0.2022	0	0.25	0.3015	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0			
3.2.3	0.2463	0	0.2022	0	0.25	0.3015	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0			
3.3.1	0.1742	0	0.365	0	0.25	0.1107	0	0	0
0	0	0	0	0	0.1				
3.3.2	0.1742	0	0.365	0	0.25	0.1107	0	0	0
0	0	0	0	0	0.1				
3.3.3	0.1742	0	0.365	0	0.25	0.1107	0	0	0
0	0	0	0	0	0.1				
3.4.1	0	0.1192	0.4222	0	0.25	0.1	0	0.1086	0
0	0	0	0	0	0	0			
3.4.2	0	0.1174	0.4326	0	0.25	0.1	0	0.1	0
0	0	0	0	0	0	0			
3.4.3	0	0.1174	0.4326	0	0.25	0.1	0	0.1	0
0	0	0	0	0	0	0			
3.5.1	0	0.1174	0.4326	0	0.25	0.1	0	0.1	0
0	0	0	0	0	0	0			
3.5.2	0	0.1174	0.4326	0	0.25	0.1	0	0.1	0
0	0	0	0	0	0	0			
3.5.3	0.1	0	0.163	0.2938	0	0	0	0.1932	0
0	0	0	0.25	0	0	0			
4.1.1	0.1087	0	0.4938	0	0.25	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0.1475			

4.1.2	0.1087	0	0.4938	0	0.25	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0.1475			
4.1.3	0.1087	0	0.4938	0	0.25	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0.1475			
4.2.1	0	0	0	0.1967	0	0	0	0.2676	0
0	0	0	0.25	0.2857	0	0			
4.2.2	0	0	0	0.1967	0	0	0	0.2676	0
0	0	0	0.25	0.2857	0	0			
4.2.3	0	0	0	0.15	0	0.338	0	0	0
0	0	0	0.25	0.262	0	0			
4.3.1	0.2068	0	0	0	0.25	0	0	0	0
0	0	0	0	0.2674	0	0.2758			
4.3.2	0.2068	0	0	0	0.25	0	0	0	0
0	0	0	0	0.2674	0	0.2758			
4.3.3	0.2068	0	0	0	0.25	0	0	0	0
0	0	0	0	0.2674	0	0.2758			
4.4.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0			
4.4.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0			
4.4.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0			
4.5.1	0	0.1	0.2536	0	0.1458	0	0	0	0
0.2022	0	0	0.1042	0.1942	0	0			
4.5.2	0.1427	0	0.3285	0	0.25	0	0	0	0
0.1	0	0.1788	0	0	0	0	0		
4.5.3	0.1427	0	0.3285	0	0.25	0	0	0	0
0.1	0	0.1788	0	0	0	0	0		
5.1.1	0.1783	0	0.2104	0	0.05	0	0	0	0
0.3612	0	0	0	0.2	0	0	0		
5.1.2	0	0.1485	0.2466	0	0.0623	0	0	0	0
0.3549	0	0	0	0.1877	0	0	0		
5.1.3	0	0.1485	0.2466	0	0.0623	0	0	0	0
0.3549	0	0	0	0.1877	0	0	0		
5.2.1	0	0	0	0.15	0	0	0	0.2731	0
0	0	0	0.25	0.3269	0	0			
5.2.2	0	0	0	0.15	0	0	0	0.2731	0
0	0	0	0.25	0.3269	0	0			
5.2.3	0.25	0	0	0	0	0	0	0	0
0.35	0	0	0	0.25	0.15	0	0		
5.3.1	0	0	0	0	0.25	0	0	0	0
0	0.2768	0	0	0.3732	0	0.1			
5.3.2	0.2376	0	0	0	0.25	0	0	0	0
0.2874	0	0	0	0.225	0	0			
5.3.3	0.2376	0	0	0	0.25	0	0	0	0
0.2874	0	0	0	0.225	0	0			
5.4.1	0	0	0.3983	0	0	0.2517	0	0	0
0	0	0	0	0.1	0.25	0			

5.4.2	0	0	0.3983	0	0	0.2517	0	0	0
0	0	0	0	0.1	0.25	0			
5.4.3	0	0	0.3983	0	0	0.2517	0	0	0
0	0	0	0	0.1	0.25	0			
5.5.1	0.1	0	0.2544	0	0.15	0	0	0.2301	0
0	0	0	0.1	0.1655	0	0			
5.5.2	0	0.1248	0.2771	0	0.1	0	0	0	
0.3481	0	0	0	0.15	0	0	0		
5.5.3	0	0.1248	0.2771	0	0.1	0	0	0	
0.3481	0	0	0	0.15	0	0	0		

;

Scalar TAUXOPPORTUNITE le taux d'opportunité pour calculer le coût de détention /0.005/ ;

Variables

QMELANGE(M,U,T) La quantité totale de mélange formé M de la cokerie U au temps T

QPRODUIT(M,U,T) La quantité de charbon à la sortie du fourneau tenant compte de la perte en humidité

QCOMMANDEEBATEAU(B,T) La quantité de charbon B(C) commandée au temps T auprès du fournisseur

QCOMMANDEETRAIN(R,T) La quantité de charbon R(C) commandée au temps T auprès du fournisseur

COMMANDERECUEPORT(B,P,T) La quantité de charbon B(C) reçue au port P au temps T

QSTOCKPORT(B,P,T) La quantité stockée de charbon B au port P durant le temps T

QTRANSPORTPORTCOKERIE(B,P,U,T) La quantité de charbon B(C) transportée du port P à la cokerie U au temps T

QTRANSPORTTRAIN(R,U,T) La quantité de charbon R(C) transportée par train jusqu'à la cokerie U au temps T

BINCHARBON (C,M,U,T) binaire prenant la valeur de 1 si le charbon C est utilisé pour le mélange M à la cokerie U au temps T et 0 sinon

BINMELANGEUTILISE(M,U,T) binaire prenant la valeur de 1 si le mélange M est bien utilisé à la cokerie U au temps T et 0 sinon

QDEMCOK(A,U,T) Quantité servie par la cokerie U à l'acheteur A au temps T

QTrainUtilise(R,U,T) quantité de charbon R arrivée par train qu'on utilise à la cokerie U au temps T

QStockCokerie(R,U,T) la quantité de charbon R se trouvant à la cokerie U au temps T (stock fictif)

COUT Le coût total à minimiser (pour l'objectif)

COUT1 Le coût d'achat de chaque tonne de charbon voyageant par bateau acheté durant la période t

COUT2 Le coût d'achat de chaque tonne de charbon voyageant par train acheté durant la période t

COUT3 Le coût de transport par bateau du charbon jusqu'aux ports

COUT4 Le coût de manutention de chaque tonne de charbon aux ports

COUT5 Le coût de détention en stock calculé en appliquant un taux d'opportunité de 0.5% aux coûts d'achat de transport jusqu'aux ports et de manutention pour représenter le coût de stock aux ports

COUT6 Le coût de transport de chaque tonne de charbon des ports aux cokeries

COUT7 Le coût de transport du charbon transporté par train jusqu'aux cokeries

COUT8 Le coût de production par tonnes de charbon présent dans chaque cokerie durant la période t ;

Positive Variables

QMELANGE(M,U,T)

QPRODUIT(M,U,T)

QCOMMANDEEBATEAU(B,T)

QCOMMANDEETRAIN(R,T)

COMMANDEECUEPORT(B,P,T)

QSTOCKPORT(B,P,T)

QTRANSPORTPORTCOKERIE(B,P,U,T)

QTRANSPORTTRAIN(R,U,T)

QDEMCOK(A,U,T)

QTrainUtilise(R,U,T)

QStockCokerie(R,U,T)

;

Binary Variables

BINCHARBON (C,M,U,T)

BINMELANGEUTILISE(M,U,T)

;

Free Variable

COUT

COUT1

COUT2

COUT3

COUT4

COUT5

COUT6

COUT7

COUT8

;

Equations

COUTTOTAL définit la fonction objectif

COUT1E Le coût d'achat de chaque tonne de charbon voyageant par bateau acheté durant la période t

COUT2E Le coût d'achat de chaque tonne de charbon voyageant par train acheté durant la période t

COUT3E Le coût de transport par bateau du charbon jusqu'aux ports

COUT4E Le coût de manutention de chaque tonne de charbon aux ports

COUT5E Le coût de détention en stock calculé en appliquant un taux d'opportunité de 0.5% aux coûts d'achat de transport jusqu'aux ports et de manutention pour représenter le coût de stock aux ports

COUT6E Le coût de transport de chaque tonne de charbon des ports aux cokeries

COUT7E Le coût de transport du charbon transporté par train jusqu'aux cokeries

COUT8E Le coût de production par tonnes de charbon présent dans chaque cokerie durant la période t

CAPMENSUELLE (U,T) La quantité de charbon entrée dans le haut fourneau ne peut dépasser la capacité mensuelle maximale

TAUXFMIN (U,T) La quantité de charbon entrée dans le haut fourneau doit au moins atteindre le taux de fonctionnement minimal requis

PRODUITFINI(M,U,T) La quantité de produit fini (après mélange) vaut la quantité entrée de chaque charbon après la perte de matière dû au taux d'humidité

STOCK(B,P,T) La quantité de charbon stocké au port est égale au stock de la période précédente avec la quantité arrivant au port moins ce qui en sort pour être distribué aux cokeries

STOCKI(B,P,T) La quantité de charbon stocké au port est égale au stock de la période précédente avec la quantité arrivant au port moins ce qui en sort pour être distribué aux cokeries en $T=1$

FLUXT(R,U,T) La quantité de charbon utilisée dans le mélange correspond à la quantité de charbon que la cokerie a reçue par train durant la même période

STOCKCok(R,U,T) La quantité de charbon stocké à la cokerie est égale au stock de la période précédente avec la quantité arrivant à la cokerie moins ce qui en sort pour être utilisé dans le mélange

STOCKCokI(R,U,T) La quantité de charbon stocké à la cokerie est égale au stock de la période précédente avec la quantité arrivant à la cokerie moins ce qui en sort pour être utilisé dans le mélange en $T=1$

FLUXB(B,U,T) La quantité de charbon utilisée dans le mélange correspond à la quantité de charbon que la cokerie a reçue des ports durant la même période

QUANTITET(R,T) La quantité de charbon transportée par train jusque chaque cokerie ne peut excéder la quantité commandée pour cette même période venant en train

QUANTITEB(B,T) La quantité de charbon transportée par bateau jusque chaque port ne peut excéder la quantité commandée pour cette même période venant en bateau

DEMANDE1 (U,T) La quantité de produits finis d'une cokerie doit satisfaire la demande de chacun des clients que celle-ci doit servir

DEMANDE2(A,T) La somme des quantités servies par chaque cokerie p à un client j doit au moins satisfaire sa demande

NBMELANGEMAX (U,T) On ne peut pas faire plus d'un certain nombre de mélanges par période à chaque cokerie

BINAIRECUTILISE(C,M,U,T) La relation entre la binaire (qui nous dit si le charbon est utilisé dans le mélange) et la quantité de charbon se trouvant dans ce même mélange

BINAIREMELANGEREALISE(M,U,T) La relation entre la binaire (qui nous dit si le mélange est réalisé) et la quantité produite de ce même mélange

;

COUTTOTAL..COUT =E= COUT1 + COUT2 + COUT3 + COUT4 + COUT5 + COUT6 + COUT7 + COUT8;

COUT1E..COUT1 =E= SUM((P,B,T), PRIXCHARBON(B,T)*COMMANDERECUEPORT(B,P,T)*TAUXCHANGE(T));

COUT2E..COUT2 =E= SUM((R,U,T),PRIXCHARBON(R,T)*QTRANSPORTTRAIN(R,U,T));

COUT3E..COUT3 =E= SUM((P,B,T), COUTTRANSPORTBATEAU (B,P)* COMMANDERECUEPORT(B,P,T)* TAUXCHANGE(T));

COUT4E..COUT4 =E= SUM((P,B,T), COUTMANUTENTION (P)*COMMANDERECUEPORT(B,P,T));

COUT5E..COUT5 =E= SUM((P,B,T), QSTOCKPORT(B,P,T)*TAUXOPPORTUNITE*[COUTMANUTENTION (P)+(COUTTRANSPORTBATEAU (B,P) + PRIXCHARBON(B,T))*TAUXCHANGE(T)]);

COUT6E..COUT6 =E= SUM((B,P,U,T), COUTTRANSPORTCOKERIE(P,U)* QTRANSPORTPORTCOKERIE(B,P,U,T));

COUT7E..COUT7 =E= SUM((R,U,T), COUTTRANSPORTTRAIN (R,U)* QTRANSPORTTRAIN(R,U,T));

COUT8E..COUT8 =E= SUM((C,M,U,T), COUTPROD(U,T)*PROPCHARBON(M,U,T,C)*QMELANGE(M,U,T));

CAPMENSUELLE (U,T)..SUM((M),QMELANGE(M,U,T))=l= CAPACITEMAX(U)*NBJOUR(T);

TAUXFMIN (U,T)..SUM((M),QMELANGE(M,U,T)) =g= TAUXMIN(U)*CAPACITEMAX(U)*NBJOUR(T);

PRODUITFINI(M,U,T)..QPRODUIT(M,U,T) =e= SUM((C),PROPCHARBON(M,U,T,C)*QMELANGE(M,U,T)*(1- HUMIDITE(C)));

STOCK(B,P,T)\$**(ord(T) GT 1)**..QSTOCKPORT(B,P,T) =e= QSTOCKPORT(B,P,T-1) + COMMANDERECUEPORT(B,P,T) - SUM((U),QTRANSPORTPORTCOKERIE(B,P,U,T));

STOCKI(B,P,T)\$**(ord(T) EQ 1)**..QSTOCKPORT(B,P,T) =e= INITSTOCK(B,P) + COMMANDERECUEPORT(B,P,T) - SUM((U),QTRANSPORTPORTCOKERIE(B,P,U,T));

FLUXT(R,U,T)..QTrainUtilise(R,U,T) =e= SUM((M), PROPCHARBON(M,U,T,R)*QMELANGE(M,U,T));

STOCKCok(R,U,T)\$**(ord(T) GT 1)**..QStockCokerie(R,U,T) =e= QStockCokerie(R,U,T-1) + QTRANSPORTTRAIN(R,U,T) - QTrainUtilise(R,U,T);

STOCKCokI(R,U,T)\$**(ord(T) EQ 1)**..QStockCokerie(R,U,T) =e= QTRANSPORTTRAIN(R,U,T) - QTrainUtilise(R,U,T);

FLUXB(B,U,T)..SUM((P),QTRANSPORTPORTCOKERIE(B,P,U,T)) =e= SUM((M), PROPCHARBON(M,U,T,B)*QMELANGE(M,U,T));

QUANTITET(R,T)..SUM((U), QTRANSPORTTRAIN(R,U,T)) =e= LIVRAISONATTENDUE-TRAIN(R,T) + QCOMMANDEETRAIN(R,T) ;

QUANTITEB(B,T)..SUM((P),COMMANDEREUEPORT(B,P,T)) =e= LIVRAISONATTENDUEBATEAU(B,T) + QCOMMANDEEBATEAU(B,T);

DEMANDE1 (U,T)..SUM((M),QPRODUIT(M,U,T)) =e= SUM((A), QDEMCOK(A,U,T));

DEMANDE2(A,T)..DEMANDE(A,T) =l= SUM(U\$Client(A,U),QDEMCOK(A,U,T));

NBMELANGEMAX (U,T)..SUM((M),BINMELANGEUTILISE(M,U,T)) =l= NBMELANGE(U,T);

BINAIREUTILISE(C,M,U,T)..BINCHARBON (C,M,U,T)*CAPACITEMAX(U)* NBJOUR(T) =g= PROPCHARBON(M,U,T,C)*QMELANGE(M,U,T);

BINAIREMELANGEREALISE(M,U,T)..BINMELANGEUTILISE(M,U,T)*CAPACITEMAX(U)* NBJOUR(T) =g= QMELANGE(M,U,T);

OPTION LimRow=50;

Model MP4 /ALL/;

Solve MP4 using MIP Minimizing COUT;

Annexe 3: Solution des sous-problèmes de la cinquième itération

Mélange	Cokerie	Période	Charbon	Proportion
5	1	1	1	0,1783
			3	0,2104
			5	0,05
			9	0,3612
			13	0,2
		2	2	0,1485
			3	0,2466
			5	0,0623
			9	0,3549
			13	0,1877
		3	2	0,1485
			3	0,2466
			5	0,0623
			9	0,3549
			13	0,1877

	2	1	4	0,15
			8	0,2731
			13	0,25
			14	0,3269
		2	4	0,15
			8	0,2731
			13	0,25
			14	0,3269
		3	1	0,25
			9	0,35
			13	0,25
			14	0,15
	3	1	5	0,25
			11	0,2768
			14	0,3732
			16	0,1
		2	1	0,2376
			5	0,25
			10	0,2874
			14	0,225
3		1	0,2376	
		5	0,25	
		10	0,2874	
		14	0,225	
4	1	3	0,3983	
		6	0,2517	
		14	0,1	
		15	0,25	
	2	3	0,3983	
		6	0,2517	
		14	0,1	
		15	0,25	
	3	3	0,3983	
		6	0,2517	
		14	0,1	
		15	0,25	
5	1	1	0,1	
		3	0,2544	
		5	0,15	
		8	0,2301	
		13	0,1	
		14	0,1655	
	2	2	0,1248	
		3	0,2771	
		5	0,1	

			9	0,3481
			13	0,15
		3	2	0,1248
			3	0,2771
			5	0,1
			9	0,3481
			13	0,15

Annexe 4 : Solution du maître-problème à la cinquième itération

FLUXT(c,u,t)

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
3 .1.1
3 .1.2	.	.	.	EPS
3 .1.3	.	.	.	EPS
3 .2.1	.	.	.	7.390
3 .2.2	.	.	.	7.390
3 .2.3	.	.	.	7.390
3 .3.1	.	.	.	EPS
3 .3.2	.	.	.	EPS
3 .3.3	.	.	.	EPS
3 .4.1	.	.	.	EPS
3 .4.2	.	.	.	EPS
3 .4.3	.	.	.	EPS
3 .5.1	.	.	.	7.747
3 .5.2	.	.	.	EPS
3 .5.3	.	.	.	EPS
6 .1.1	.	.	.	6.759
6 .1.2	.	.	.	6.759
6 .1.3	.	.	.	4.770
6 .2.1	.	.	.	6.351
6 .2.2	.	.	.	6.351
6 .2.3	.	.	.	4.362
6 .3.1	.	.	.	EPS
6 .3.2	.	.	.	EPS
6 .3.3	.	.	.	EPS
6 .4.1	.	.	.	8.169
6 .4.2	.	.	.	EPS
6 .4.3	.	.	.	EPS
6 .5.1	.	.	.	4.399
6 .5.2	.	.	.	4.399
6 .5.3	.	.	.	2.410
7 .1.1	.	.	.	4.670
7 .1.2	.	.	.	4.670
7 .1.3	.	.	.	4.670
7 .2.1
7 .2.2
7 .2.3	.	.	.	4.263
7 .3.1
7 .3.2
7 .3.3
7 .4.1	.	.	.	EPS
7 .4.2	.	.	.	EPS

7 .4.3	.	.	.	EPS
7 .5.1	.	.	.	2.310
7 .5.2	.	.	.	2.310
7 .5.3	.	.	.	2.310
8 .1.1	.	.	.	.
8 .1.2	.	.	.	.
8 .1.3	.	.	.	.
8 .2.1	.	.	.	EPS
8 .2.2	.	.	.	EPS
8 .2.3	.	.	.	.
8 .3.1	.	.	.	.
8 .3.2	.	.	.	.
8 .3.3	.	.	.	.
8 .4.1	.	.	.	EPS
8 .4.2	.	.	.	EPS
8 .4.3	.	.	.	EPS
8 .5.1	.	.	.	EPS
8 .5.2	.	.	.	EPS
8 .5.3	.	.	.	EPS
9 .1.1	.	.	.	EPS
9 .1.2	.	.	.	EPS
9 .1.3	.	.	.	EPS
9 .2.1	.	.	.	7.447
9 .2.2	.	.	.	7.390
9 .2.3	.	.	.	EPS
9 .3.1	.	.	.	0.057
9 .3.2	.	.	.	EPS
9 .3.3	.	.	.	EPS
9 .4.1	.	.	.	8.347
9 .4.2	.	.	.	8.290
9 .4.3	.	.	.	8.290
9 .5.1	.	.	.	7.804
9 .5.2	.	.	.	EPS
9 .5.3	.	.	.	EPS
13.1.1	.	.	.	EPS
13.1.2	.	.	.	EPS
13.1.3	.	.	.	EPS
13.2.1	.	.	.	EPS
13.2.2	.	.	.	EPS
13.2.3	.	.	.	EPS
13.3.1	.	.	.	.
13.3.2	.	.	.	.
13.3.3	.	.	.	.
13.4.1	.	.	.	.
13.4.2	.	.	.	.
13.4.3	.	.	.	.
13.5.1	.	.	.	EPS
13.5.2	.	.	.	EPS
13.5.3	.	.	.	EPS
15.1.1	.	.	.	4.670
15.1.2	.	.	.	4.670
15.1.3	.	.	.	4.670
15.2.1	.	.	.	4.263
15.2.2	.	.	.	4.263
15.2.3	.	.	.	4.263
15.3.1	.	.	.	.
15.3.2	.	.	.	.
15.3.3	.	.	.	.

15.4.1	.	.	.	EPS
15.4.2	.	.	.	EPS
15.4.3	.	.	.	EPS
15.5.1	.	.	.	2.310
15.5.2	.	.	.	2.310
15.5.3	.	.	.	2.310

FLUXB (c,u,t)

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
1 .1.1	.	.	.	3.697
1 .1.2	.	.	.	3.967
1 .1.3	.	.	.	4.224
1 .2.1	.	.	.	1.867
1 .2.2	.	.	.	2.137
1 .2.3	.	.	.	2.394
1 .3.1	.	.	.	-0.771
1 .3.2	.	.	.	-0.501
1 .3.3	.	.	.	-0.244
1 .4.1	.	.	.	3.089
1 .4.2	.	.	.	3.359
1 .4.3	.	.	.	3.616
1 .5.1	.	.	.	1.689
1 .5.2	.	.	.	1.959
1 .5.3	.	.	.	2.216
2 .1.1	.	.	.	57.824
2 .1.2	.	.	.	3.972
2 .1.3	.	.	.	4.226
2 .2.1	.	.	.	55.994
2 .2.2	.	.	.	2.142
2 .2.3	.	.	.	2.396
2 .3.1	.	.	.	53.356
2 .3.2	.	.	.	-0.495
2 .3.3	.	.	.	-0.241
2 .4.1	.	.	.	57.216
2 .4.2	.	.	.	3.365
2 .4.3	.	.	.	3.619
2 .5.1	.	.	.	55.816
2 .5.2	.	.	.	1.965
2 .5.3	.	.	.	2.219
4 .1.1	.	.	.	5.802
4 .1.2	.	.	.	6.053
4 .1.3	.	.	.	6.292
4 .2.1	.	.	.	4.584
4 .2.2	.	.	.	4.835
4 .2.3	.	.	.	5.074
4 .3.1	.	.	.	1.334
4 .3.2	.	.	.	1.585
4 .3.3	.	.	.	1.824
4 .4.1	.	.	.	5.194
4 .4.2	.	.	.	5.445
4 .4.3	.	.	.	5.684
4 .5.1	.	.	.	5.439
4 .5.2	.	.	.	5.690
4 .5.3	.	.	.	5.929
5 .1.1	.	.	.	3.669
5 .1.2	.	.	.	3.949

5 .1.3	.	.	.	4.215
5 .2.1	.	.	.	1.839
5 .2.2	.	.	.	2.119
5 .2.3	.	.	.	2.385
5 .3.1	.	.	.	-0.799
5 .3.2	.	.	.	-0.519
5 .3.3	.	.	.	-0.253
5 .4.1	.	.	.	3.061
5 .4.2	.	.	.	3.341
5 .4.3	.	.	.	3.607
5 .5.1	.	.	.	1.661
5 .5.2	.	.	.	1.941
5 .5.3	.	.	.	2.207
10.1.1	.	.	.	56.995
10.1.2	.	.	.	3.980
10.1.3	.	.	.	4.230
10.2.1	.	.	.	55.165
10.2.2	.	.	.	2.150
10.2.3	.	.	.	2.400
10.3.1	.	.	.	52.528
10.3.2	.	.	.	-0.487
10.3.3	.	.	.	-0.237
10.4.1	.	.	.	56.388
10.4.2	.	.	.	3.373
10.4.3	.	.	.	3.623
10.5.1	.	.	.	54.988
10.5.2	.	.	.	1.973
10.5.3	.	.	.	2.223
11.1.1	.	.	.	3.688
11.1.2	.	.	.	3.961
11.1.3	.	.	.	4.221
11.2.1	.	.	.	1.858
11.2.2	.	.	.	2.131
11.2.3	.	.	.	2.391
11.3.1	.	.	.	-0.780
11.3.2	.	.	.	-0.507
11.3.3	.	.	.	-0.247
11.4.1	.	.	.	3.080
11.4.2	.	.	.	3.353
11.4.3	.	.	.	3.613
11.5.1	.	.	.	1.680
11.5.2	.	.	.	1.953
11.5.3	.	.	.	2.213
12.1.1	.	.	.	3.805
12.1.2	.	.	.	4.037
12.1.3	.	.	.	4.258
12.2.1	.	.	.	1.975
12.2.2	.	.	.	2.207
12.2.3	.	.	.	2.428
12.3.1	.	.	.	-0.663
12.3.2	.	.	.	-0.431
12.3.3	.	.	.	-0.210
12.4.1	.	.	.	3.197
12.4.2	.	.	.	3.429
12.4.3	.	.	.	3.650
12.5.1	.	.	.	1.797
12.5.2	.	.	.	2.029
12.5.3	.	.	.	2.250

14.1.1	.	.	.	3.758
14.1.2	.	.	.	4.006
14.1.3	.	.	.	4.243
14.2.1	.	.	.	1.928
14.2.2	.	.	.	2.176
14.2.3	.	.	.	2.413
14.3.1	.	.	.	-0.710
14.3.2	.	.	.	-0.461
14.3.3	.	.	.	-0.225
14.4.1	.	.	.	3.150
14.4.2	.	.	.	3.399
14.4.3	.	.	.	3.635
14.5.1	.	.	.	1.750
14.5.2	.	.	.	1.999
14.5.3	.	.	.	2.235
16.1.1	.	.	.	4.241
16.1.2	.	.	.	4.511
16.1.3	.	.	.	4.768
16.2.1	.	.	.	2.411
16.2.2	.	.	.	2.681
16.2.3	.	.	.	2.938
16.3.1	.	.	.	-0.226
16.3.2	.	.	.	0.044
16.3.3	.	.	.	0.301
16.4.1	.	.	.	3.634
16.4.2	.	.	.	3.904
16.4.3	.	.	.	4.161
16.5.1	.	.	.	2.234
16.5.2	.	.	.	2.504
16.5.3	.	.	.	2.761

QPRODUIT

Mélange	Cokerie	Période	Quantité
1	1	1	65215,64
		2	58904,45
		3	56653,08
	2	1	0
		2	0
		3	35480,18
	3	1	0
		2	0
		3	0
	4	1	0
		2	0
		3	0
	5	1	4898,112
		2	68132
		3	71162
2	1	1	0
		2	0

		3	0
	2	1	2160,531
		2	33977,67
		3	0
	3	1	26840,35
		2	26600
		3	8560,184
	4	1	58452
		2	49002
		3	51644
	5	1	63617,89
		2	0
		3	0
3	1	1	0
		2	0
		3	0
	2	1	48483,48
		2	33817,88
		3	13020,91
	3	1	0
		2	0
		3	0
	4	1	0
		2	0
		3	0
	5	1	0
		2	0
		3	0
4	1	1	0
		2	0
		3	0
	2	1	0
		2	0
		3	0
	3	1	0
		2	0
		3	18085,65
	4	1	0
		2	0
		3	0
	5	1	0
		2	0
		3	0
5	1	1	0
		2	0

		3	0
	2	1	0
		2	0
		3	0
	3	1	0
		2	0
		3	0
	4	1	0
		2	0
		3	0
	5	1	0
		2	0
		3	0

QMELANGE

Mélange	Cokerie	Période	Quantité
1	1	1	71300
		2	64400
		3	61938,58
	2	1	0
		2	0
		3	38840,98
	3	1	0
		2	0
		3	0
	4	1	0
		2	0
		3	0
	5	1	5358,623
		2	74537,65
		3	77852,52
2	1	1	0
		2	0
		3	0
	2	1	2347,42
		2	36916,79
		3	0
	3	1	29062,5
		2	28802,26
		3	9268,895
	4	1	63291,33
		2	53058,95
		3	55919,69
	5	1	68884,91

		2	0
		3	0
3	1	1	0
		2	0
		3	0
	2	1	52758,5
		2	36799,76
		3	14169,02
	3	1	0
		2	0
		3	0
	4	1	0
		2	0
		3	0
	5	1	0
		2	0
		3	0
4	1	1	0
		2	0
		3	0
	2	1	0
		2	0
		3	0
	3	1	0
		2	0
		3	19793,6
	4	1	1808,668
		2	5741,048
		3	9180,312
	5	1	0
		2	0
		3	0
5	1	1	0
		2	0
		3	0
	2	1	0
		2	0
		3	0
	3	1	0
		2	0
		3	0
	4	1	0
		2	0
		3	0
	5	1	0

		2	0
		3	0

QCOMMANDEEBATEAU

Charbon	Période	Quantité
1	1	0
	2	0
	3	0
2	1	0
	2	0
	3	0
4	1	0
	2	0
	3	0
5	1	0
	2	0
	3	0
10	1	0
	2	0
	3	0
11	1	0
	2	0
	3	0
12	1	0
	2	0
	3	0
14	1	0
	2	0
	3	0
16	1	0
	2	0
	3	0

QCOMMANDEETRAIN

Charbon	Période	Quantité
3	1	0
	2	0
	3	0
6	1	0
	2	0
	3	0
7	1	0

	2	0
	3	0
8	1	0
	2	0
	3	0
9	1	0
	2	0
	3	0
13	1	0
	2	0
	3	0
15	1	0
	2	0
	3	0

COMMANDERECUEPORT

Charbon	Port	Période	Quantité
1	1	1	61277,59
		2	39437,05
		3	23855,78
	2	1	8722,41
		2	30562,95
		3	76144,22
2	1	1	0
		2	0
		3	0
	2	1	0
		2	0
		3	0
4	1	1	0
		2	0
		3	0
	2	1	0
		2	0
		3	0
5	1	1	22489,68
		2	0
		3	17522,18
	2	1	17510,32
		2	0
		3	42477,82
10	1	1	0
		2	0
		3	0

	2	1	0
		2	0
		3	0
11	1	1	0
		2	0
		3	0
	2	1	0
		2	0
		3	0
12	1	1	0
		2	0
		3	0
	2	1	0
		2	0
		3	0
14	1	1	31219,39
		2	0
		3	37502,57
	2	1	8780,609
		2	0
		3	22497,43
16	1	1	21861,95
		2	18025,07
		3	0
	2	1	3138,049
		2	6974,933
		3	0

QSTOCKPORT

Charbon	Port	Période	Quantité
1	1	1	0
		2	0
		3	0
	2	1	5757,847
		2	25831,02
		3	94506,19
2	1	1	0
		2	0
		3	0
	2	1	0
		2	0
		3	0
4	1	1	0

		2	0
		3	0
	2	1	20531,13
		2	12345
		3	0
5	1	1	18429,14
		2	0
		3	0
	2	1	32814,7
		2	12349,39
		3	47561,59
10	1	1	0
		2	0
		3	0
	2	1	0
		2	0
		3	0
11	1	1	5950
		2	5950
		3	5950
	2	1	0
		2	0
		3	0
12	1	1	0
		2	0
		3	0
	2	1	0
		2	0
		3	0
14	1	1	48316,31
		2	0
		3	0
	2	1	8780,609
		2	8780,609
		3	4678,357
16	1	1	0
		2	9249,116
		3	0
	2	1	4781,112
		2	6992,151
		3	0

QTRANSPORTPORTCOKERIE

Charbon	Port	Cokerie	Période	Quantité
---------	------	---------	---------	----------

1	1	1	1	0	
			2	0	
			3	0	
		2	1	13697	
			2	20112,98	
			3	3489,831	
		3	1	0	
			2	0	
			3	0	
		4	1	23050,7	
			2	19324,07	
			3	20365,95	
		5	1	25087,89	
			2	0	
			3	0	
	2	1	1	1	0
				2	0
				3	0
			2	1	0
				2	0
				3	0
3			1	10584,56	
			2	10489,78	
			3	7469,049	
4		1	0		
		2	0		
		3	0		
5		1	0		
		2	0		
		3	0		
2	1	1	1	0	
			2	0	
			3	0	
		2	1	0	
			2	0	
			3	0	
		3	1	0	
			2	0	
			3	0	
		4	1	0	
			2	0	
			3	0	
		5	1	0	
			2	0	
			3	0	

	2	1	1	0		
				2	0	
				3	0	
			2	1	0	
				2	0	
				3	0	
			3	1	0	
				2	0	
				3	0	
			4	1	0	
				2	0	
				3	0	
			5	1	0	
				2	0	
				3	0	
4	1	1	1	0		
			2	0		
			3	0		
				2	1	0
					2	0
					3	0
				3	1	0
					2	0
					3	0
				4	1	0
					2	0
					3	0
				5	1	0
					2	0
					3	0
		2	1	1	0	
					2	0
					3	0
				2	1	0
					2	0
					3	5826,146
				3	1	2906,25
					2	2880,226
					3	926,8895
				4	1	6329,133
					2	5305,895
					3	5591,969
		5	1	6888,491		
			2	0		
			3	0		

5	1	1	1	0
			2	0
			3	0
		2	1	13776,48
			2	18429,14
			3	3542,256
		3	1	0
			2	0
			3	0
		4	1	15822,83
			2	0
			3	13979,92
		5	1	17221,23
			2	0
			3	0
	2	1	1	0
			2	0
			3	0
		2	1	0
			2	0
			3	0
		3	1	7265,625
			2	7200,564
			3	7265,625
		4	1	0
			2	13264,74
			3	0
5		1	0	
		2	0	
		3	0	
10	1	1	1	0
			2	0
			3	0
		2	1	0
			2	0
			3	0
		3	1	0
			2	0
			3	0
		4	1	0
			2	0
			3	0
		5	1	0
			2	0
			3	0

	2	1	1	0
			2	0
			3	0
		2	1	0
			2	0
			3	0
		3	1	0
			2	0
			3	0
		4	1	0
			2	0
			3	0
		5	1	0
			2	0
			3	0
11	1	1	1	0
			2	0
			3	0
		2	1	0
			2	0
			3	0
		3	1	0
			2	0
			3	0
		4	1	0
			2	0
			3	0
		5	1	0
			2	0
			3	0
2	2	1	1	0
			2	0
			3	0
		2	1	0
			2	0
			3	0
		3	1	0
			2	0
			3	0
		4	1	0
			2	0
			3	0
		5	1	0
			2	0
			3	0

12	1	1	1	0
			2	0
			3	0
		2	1	0
			2	0
			3	0
		3	1	0
			2	0
			3	0
		4	1	0
			2	0
			3	0
		5	1	0
			2	0
			3	0
	2	1	1	0
			2	0
			3	0
		2	1	0
			2	0
			3	0
		3	1	0
			2	0
			3	0
		4	1	0
			2	0
			3	0
		5	1	0
			2	0
			3	0
14	1	1	1	24527,2
			2	22153,6
			3	0
		2	1	0
			2	0
			3	10176,34
		3	1	0
			2	0
			3	0
4	1	0		
	2	0		
	3	0		
5	1	1880,877		
	2	26162,71		
	3	27326,23		

	2	1	1	0
			2	0
			3	21306,87
		2	1	0
			2	0
			3	0
		3	1	0
			2	0
			3	5292,81
		4	1	0
			2	0
			3	0
		5	1	0
			2	0
			3	0
16	1	1	1	0
			2	0
			3	0
		2	1	0
			2	0
			3	0
		3	1	0
			2	0
			3	0
		4	1	10468,39
			2	8775,951
			3	9249,116
		5	1	11393,56
			2	0
			3	0
	2	1	1	0
			2	0
			3	0
		2	1	0
			2	0
			3	0
		3	1	4806,938
			2	4763,893
			3	6992,151
		4	1	0
			2	0
			3	0
5		1	0	
		2	0	
		3	0	

QTRANSPORTTRAIN

Charbon	Cokerie	Période	Quantité
3	1	1	0
		2	0
		3	0
	2	1	26000
		2	2853,984
		3	0
	3	1	0
		2	23146,02
		3	26000
	4	1	0
		2	0
		3	0
	5	1	0
		2	0
		3	0
6	1	1	25382,8
		2	22926,4
		3	22050,14
	2	1	15906,69
		2	11095,13
		3	4271,961
	3	1	0
		2	0
		3	0
	4	1	0
		2	0
		3	0
	5	1	8310,512
		2	15578,47
		3	23277,9
7	1	1	3565
		2	3220
		3	3096,929
	2	1	0
		2	9210,431
		3	3917,819
	3	1	3245,373
		2	2369,569
		3	0
	4	1	0

		2	0
		3	0
	5	1	7989,627
		2	0
		3	7785,252
8	1	1	0
		2	0
		3	0
	2	1	0
		2	0
		3	0
	3	1	10000
		2	10000
		3	10000
	4	1	0
		2	0
		3	0
	5	1	0
		2	0
		3	0
9	1	1	0
		2	0
		3	0
	2	1	586,8551
		2	9229,197
		3	0
	3	1	3499,125
		2	3467,792
		3	14181,98
	4	1	7620,276
		2	7303,011
		3	5818,017
	5	1	8293,743
		2	0
		3	0
13	1	1	0
		2	0
		3	0
	2	1	0
		2	0
		3	0
	3	1	16000
		2	16000
		3	16000
	4	1	0

		2	0
		3	0
	5	1	0
		2	0
		3	0
15	1	1	17825
		2	16100
		3	15484,65
	2	1	9710,244
		2	0
		3	0
	3	1	13525,1
		2	7665,588
		3	7452,224
	4	1	0
		2	0
		3	0
	5	1	1339,656
		2	18634,41
		3	19463,13

BINCHARBON

Charbon	Mélange	Cokerie	Période	Binaire
1	1	1	1	0
			2	0
			3	0
		2	1	0
			2	0
			3	0
		3	1	0
			2	0
			3	0
		4	1	0
			2	0
			3	0
		5	1	0
			2	0
			3	0
	2	1	1	1
			2	1
			3	1
		2	1	1
			2	1
			3	1

		3	1	1
			2	1
			3	1
		4	1	1
			2	1
			3	1
		5	1	1
			2	1
			3	1
	3	1	1	0
			2	0
			3	0
		2	1	1
			2	1
			3	1
3		1	1	
		2	1	
		3	1	
4		1	0	
		2	0	
		3	0	
5		1	0	
		2	0	
		3	1	
4	1	1	1	
		2	1	
		3	1	
	2	1	0	
		2	0	
		3	0	
	3	1	1	
		2	1	
		3	1	
	4	1	0	
		2	0	
		3	0	
	5	1	0	
		2	1	
		3	1	
5	1	1	1	
		2	0	
		3	0	
	2	1	0	
		2	0	
		3	1	

		3	1	0
			2	1
			3	1
		4	1	0
			2	0
			3	0
		5	1	1
			2	0
			3	0
2	1	1	1	0
			2	0
			3	0
		2	1	0
			2	0
			3	0
		3	1	0
			2	0
			3	0
		4	1	0
			2	0
			3	0
		5	1	0
			2	0
			3	0
	2	1	1	0
			2	0
			3	0
		2	1	0
			2	0
			3	0
		3	1	0
			2	0
			3	0
		4	1	0
			2	0
			3	0
5		1	0	
		2	0	
		3	0	
3	1	1	1	
		2	1	
		3	1	
	2	1	0	
		2	0	
		3	0	

		3	1	0	
			2	0	
			3	0	
		4	4	1	1
				2	1
				3	1
		5	5	1	1
				2	1
				3	0
	4	1	1	0	
			2	0	
			3	0	
		2	2	1	0
				2	0
				3	0
		3	3	1	0
				2	0
				3	0
		4	4	1	0
				2	0
				3	0
		5	5	1	1
				2	0
				3	0
	5	1	1	0	
			2	1	
			3	1	
		2	2	1	0
				2	0
				3	0
3		3	1	0	
			2	0	
			3	0	
4		4	1	0	
			2	0	
			3	0	
5		5	1	0	
			2	1	
			3	1	
3	1	1	1	0	
			2	0	
			3	0	
		2	2	1	0
				2	0
				3	0

		3	1	0
			2	0
			3	0
		4	1	0
			2	0
			3	0
		5	1	0
			2	0
			3	0
	2	1	1	1
			2	1
			3	1
		2	1	1
			2	1
			3	1
3		1	0	
		2	0	
		3	0	
4		1	0	
		2	0	
		3	0	
5		1	0	
		2	0	
		3	0	
3	1	1	0	
		2	0	
		3	0	
	2	1	1	
		2	1	
		3	1	
	3	1	1	
		2	1	
		3	1	
	4	1	1	
		2	1	
		3	1	
	5	1	1	
		2	1	
		3	1	
4	1	1	1	
		2	1	
		3	1	
	2	1	0	
		2	0	
		3	0	

		3	1	0	
			2	0	
			3	0	
		4	1	0	
			2	0	
			3	0	
		5	1	1	
			2	1	
			3	1	
		5	1	1	1
				2	1
				3	1
	2		1	0	
			2	0	
			3	0	
	3		1	0	
			2	0	
			3	0	
	4		1	1	
			2	1	
			3	1	
	5		1	1	
			2	1	
			3	1	
4	1	1	1	0	
			2	0	
			3	0	
		2	1	1	
			2	1	
			3	1	
		3	1	0	
			2	0	
			3	0	
		4	1	0	
			2	0	
			3	0	
		5	1	0	
			2	0	
			3	0	
	2	1	1	0	
			2	0	
			3	0	
2		1	0		
		2	0		
		3	0		

		3	1	1
			2	1
			3	1
		4	1	1
			2	1
			3	1
		5	1	1
			2	1
			3	1
	3	1	1	1
			2	1
			3	1
		2	1	0
			2	0
			3	0
3		1	0	
		2	0	
		3	0	
4		1	0	
		2	0	
		3	0	
5		1	0	
		2	0	
		3	1	
4	1	1	0	
		2	0	
		3	0	
	2	1	1	
		2	1	
		3	1	
	3	1	0	
		2	0	
		3	0	
	4	1	0	
		2	0	
		3	0	
	5	1	0	
		2	0	
		3	0	
5	1	1	0	
		2	0	
		3	0	
	2	1	1	
		2	1	
		3	0	

		3	1	0
			2	0
			3	0
		4	1	0
			2	0
			3	0
		5	1	0
			2	0
			3	0
5	1	1	1	0
			2	0
			3	0
		2	1	0
			2	0
			3	0
		3	1	1
			2	1
			3	1
		4	1	0
			2	0
			3	0
		5	1	0
			2	0
			3	0
	2	1	1	1
			2	1
			3	1
		2	1	1
			2	1
			3	1
		3	1	1
			2	1
			3	1
		4	1	1
			2	1
			3	1
5		1	1	
		2	1	
		3	1	
3	1	1	0	
		2	0	
		3	0	
	2	1	1	
		2	1	
		3	1	

		3	1	1
			2	1
			3	1
		4	1	1
			2	1
			3	1
		5	1	1
			2	1
			3	0
	4	1	1	1
			2	1
			3	1
		2	1	0
			2	0
			3	0
		3	1	1
			2	1
			3	1
		4	1	0
			2	0
			3	0
5		1	1	
		2	1	
		3	1	
5	1	1	1	
		2	1	
		3	1	
	2	1	0	
		2	0	
		3	0	
	3	1	1	
		2	1	
		3	1	
	4	1	0	
		2	0	
		3	0	
	5	1	1	
		2	1	
		3	1	
6	1	1	1	
		2	1	
		3	1	
	2	1	1	
		2	1	
		3	0	

		3	1	0
			2	0
			3	0
		4	1	1
			2	1
			3	1
		5	1	1
			2	1
			3	1
	2	1	1	0
			2	0
			3	0
		2	1	0
			2	0
			3	0
3		1	0	
		2	0	
		3	0	
4		1	0	
		2	0	
		3	0	
5		1	0	
		2	0	
		3	0	
3	1	1	0	
		2	0	
		3	0	
	2	1	1	
		2	1	
		3	1	
	3	1	1	
		2	1	
		3	1	
	4	1	1	
		2	1	
		3	1	
	5	1	1	
		2	1	
		3	0	
4	1	1	0	
		2	0	
		3	0	
	2	1	0	
		2	0	
		3	1	

		3	1	0	
			2	0	
			3	0	
		4	1	0	
			2	0	
			3	0	
		5	1	0	
			2	0	
			3	0	
		5	1	1	0
				2	0
				3	0
			2	1	0
				2	0
				3	0
	3		1	0	
			2	0	
			3	0	
	4		1	1	
			2	1	
			3	1	
	5		1	0	
			2	0	
			3	0	
	7	1	1	1	1
				2	1
				3	1
			2	1	0
				2	0
				3	1
3			1	0	
			2	0	
			3	0	
4			1	1	
			2	1	
			3	1	
5			1	1	
			2	1	
			3	1	
2	1	1	0		
		2	0		
		3	0		
	2	1	0		
		2	0		
		3	0		

		3	1	0
			2	0
			3	0
		4	1	0
			2	0
			3	0
		5	1	0
			2	0
			3	0
	3	1	1	0
			2	0
			3	0
		2	1	0
			2	0
			3	0
3		1	0	
		2	0	
		3	0	
4		1	0	
		2	0	
		3	0	
5		1	0	
		2	0	
		3	0	
4	1	1	0	
		2	0	
		3	0	
	2	1	0	
		2	0	
		3	0	
	3	1	0	
		2	0	
		3	0	
	4	1	0	
		2	0	
		3	0	
	5	1	0	
		2	0	
		3	0	
5	1	1	0	
		2	0	
		3	0	
	2	1	0	
		2	0	
		3	0	

		3	1	0
			2	0
			3	0
		4	1	0
			2	0
			3	0
		5	1	0
			2	0
			3	0
8	1	1	1	0
			2	0
			3	0
		2	1	0
			2	0
			3	0
		3	1	0
			2	0
			3	0
		4	1	0
			2	0
			3	0
		5	1	0
			2	0
			3	0
	2	1	1	0
			2	0
			3	0
		2	1	0
			2	0
			3	0
		3	1	0
			2	0
			3	0
		4	1	0
			2	0
			3	0
5		1	0	
		2	0	
		3	0	
3	1	1	0	
		2	0	
		3	0	
	2	1	0	
		2	0	
		3	0	

		3	1	0
			2	0
			3	0
		4	1	1
			2	1
			3	1
		5	1	1
			2	1
			3	1
	4	1	1	0
			2	0
			3	0
		2	1	1
			2	1
			3	0
		3	1	0
			2	0
			3	0
		4	1	0
			2	0
			3	0
		5	1	0
			2	0
			3	0
	5	1	1	0
			2	0
			3	0
2		1	1	
		2	1	
		3	0	
3		1	0	
		2	0	
		3	0	
4		1	0	
		2	0	
		3	0	
5		1	1	
		2	0	
		3	0	
9	1	1	0	
		2	0	
		3	0	
	2	1	0	
		2	0	
		3	0	

		3	1	0
			2	0
			3	0
		4	1	0
			2	0
			3	0
		5	1	0
			2	0
			3	0
	2	1	1	0
			2	0
			3	0
		2	1	1
			2	1
			3	1
		3	1	1
			2	1
			3	1
4		1	1	
		2	1	
		3	1	
5		1	1	
		2	1	
		3	1	
3	1	1	1	
		2	1	
		3	1	
	2	1	0	
		2	0	
		3	0	
	3	1	0	
		2	0	
		3	0	
	4	1	0	
		2	0	
		3	0	
	5	1	0	
		2	0	
		3	0	
4	1	1	0	
		2	0	
		3	0	
	2	1	0	
		2	0	
		3	0	

		3	1	0	
			2	0	
			3	0	
		4	1	0	
			2	0	
			3	0	
		5	1	0	
			2	1	
			3	1	
		5	1	1	1
				2	1
				3	1
	2		1	0	
			2	0	
			3	1	
	3		1	0	
			2	0	
			3	0	
	4		1	0	
			2	0	
			3	0	
	5	1	0		
		2	1		
		3	1		
10	1	1	1	0	
			2	0	
			3	0	
		2	1	0	
			2	0	
			3	0	
		3	1	1	
			2	1	
			3	1	
		4	1	0	
			2	0	
			3	0	
5	1	0			
	2	0			
	3	0			
2	1	1	0		
		2	0		
		3	0		
	2	1	0		
		2	0		
		3	0		

		3	1	0
			2	0
			3	0
		4	1	0
			2	0
			3	0
		5	1	0
			2	0
			3	0
	3	1	1	0
			2	0
			3	0
		2	1	0
			2	0
			3	0
3		1	0	
		2	0	
		3	0	
4		1	0	
		2	0	
		3	0	
5		1	0	
		2	0	
		3	0	
4	1	1	0	
		2	0	
		3	0	
	2	1	0	
		2	0	
		3	0	
	3	1	0	
		2	0	
		3	0	
	4	1	0	
		2	0	
		3	0	
	5	1	1	
		2	0	
		3	0	
5	1	1	0	
		2	0	
		3	0	
	2	1	0	
		2	0	
		3	0	

		3	1	0
			2	1
			3	1
		4	1	0
			2	0
			3	0
		5	1	0
			2	0
			3	0
11	1	1	1	0
			2	0
			3	0
		2	1	0
			2	0
			3	0
		3	1	0
			2	0
			3	0
		4	1	0
			2	0
			3	0
		5	1	0
			2	0
			3	0
	2	1	1	0
			2	0
			3	0
		2	1	0
			2	0
			3	0
		3	1	0
			2	0
			3	0
		4	1	0
			2	0
			3	0
5		1	0	
		2	0	
		3	0	
3	1	1	1	
		2	1	
		3	1	
	2	1	0	
		2	0	
		3	0	

		3	1	0	
			2	0	
			3	0	
		4	1	1	0
				2	0
				3	0
		5	1	1	0
				2	0
				3	0
	4	1	1	0	
			2	0	
			3	0	
		2	1	1	0
				2	0
				3	0
		3	1	1	0
				2	0
				3	0
		4	1	1	0
				2	0
				3	0
		5	1	1	0
				2	1
				3	1
	5	1	1	0	
			2	0	
			3	0	
2		1	1	0	
			2	0	
			3	0	
3		1	1	1	
			2	0	
			3	0	
4		1	1	0	
			2	0	
			3	0	
5		1	1	0	
			2	0	
			3	0	
12	1	1	1	0	
			2	0	
			3	0	
		2	1	1	0
				2	0
				3	0

		3	1	1
			2	1
			3	1
		4	1	0
			2	0
			3	1
		5	1	0
			2	0
			3	0
	2	1	1	0
			2	0
			3	0
		2	1	0
			2	0
			3	0
3		1	0	
		2	0	
		3	0	
4		1	0	
		2	0	
		3	0	
5		1	0	
		2	0	
		3	0	
3	1	1	1	
		2	1	
		3	1	
	2	1	0	
		2	0	
		3	0	
	3	1	0	
		2	0	
		3	0	
	4	1	0	
		2	0	
		3	0	
	5	1	0	
		2	0	
		3	0	
4	1	1	0	
		2	0	
		3	0	
	2	1	0	
		2	0	
		3	0	

		3	1	0	
			2	0	
			3	0	
		4	1	0	
			2	0	
			3	0	
		5	1	0	
			2	0	
			3	0	
		5	1	1	0
				2	0
				3	0
	2		1	0	
			2	0	
			3	0	
	3		1	0	
			2	0	
			3	0	
	4		1	0	
			2	0	
			3	0	
	5		1	0	
			2	0	
			3	0	
13	1	1	1	0	
			2	0	
			3	0	
		2	1	0	
			2	0	
			3	0	
		3	1	0	
			2	0	
			3	0	
		4	1	0	
			2	0	
			3	0	
	5	1	0		
		2	0		
		3	0		
2	1	1	0		
		2	0		
		3	0		
2	2	1	0		
		2	0		
		3	0		

		3	1	0
			2	0
			3	0
		4	1	0
			2	0
			3	0
		5	1	0
			2	0
			3	0
	3	1	1	1
			2	1
			3	1
		2	1	0
			2	0
			3	0
3		1	0	
		2	0	
		3	0	
4		1	0	
		2	0	
		3	0	
5		1	0	
		2	0	
		3	1	
4	1	1	0	
		2	0	
		3	0	
	2	1	1	
		2	1	
		3	1	
	3	1	0	
		2	0	
		3	0	
	4	1	0	
		2	0	
		3	0	
	5	1	1	
		2	0	
		3	0	
5	1	1	1	
		2	1	
		3	1	
	2	1	1	
		2	1	
		3	1	

		3	1	0
			2	0
			3	0
		4	1	0
			2	0
			3	0
		5	1	1
			2	1
			3	1
14	1	1	1	1
			2	1
			3	1
		2	1	1
			2	1
			3	1
		3	1	1
			2	1
			3	1
		4	1	1
			2	1
			3	1
		5	1	1
			2	1
			3	1
	2	1	1	0
			2	0
			3	0
		2	1	0
			2	0
			3	0
		3	1	0
			2	0
			3	0
		4	1	0
			2	0
			3	0
5		1	0	
		2	0	
		3	0	
3	1	1	0	
		2	0	
		3	0	
	2	1	0	
		2	0	
		3	0	

		3	1	0
			2	0
			3	0
		4	1	0
			2	0
			3	0
		5	1	0
			2	0
			3	0
	4	1	1	0
			2	0
			3	0
		2	1	1
			2	1
			3	1
		3	1	1
			2	1
			3	1
		4	1	0
			2	0
			3	0
		5	1	1
			2	0
			3	0
	5	1	1	0
			2	0
			3	0
		2	1	1
			2	1
			3	1
3		1	1	
		2	1	
		3	1	
4		1	1	
		2	1	
		3	1	
5		1	1	
		2	0	
		3	0	
15	1	1	1	
		2	1	
		3	1	
	2	1	1	
		2	1	
		3	1	

		3	1	0
			2	0
			3	0
		4	1	1
			2	1
			3	1
		5	1	1
			2	1
			3	1
	2	1	1	0
			2	0
			3	0
		2	1	0
			2	0
			3	0
3		1	0	
		2	0	
		3	0	
4		1	0	
		2	0	
		3	0	
5		1	0	
		2	0	
		3	0	
3	1	1	0	
		2	0	
		3	0	
	2	1	0	
		2	0	
		3	0	
	3	1	0	
		2	0	
		3	0	
	4	1	0	
		2	0	
		3	0	
	5	1	0	
		2	0	
		3	0	
4	1	1	0	
		2	0	
		3	0	
	2	1	0	
		2	0	
		3	0	

		3	1	0	
			2	0	
			3	0	
		4	1	0	
			2	0	
			3	0	
		5	1	0	
			2	0	
			3	0	
		5	1	1	0
				2	0
				3	0
	2		1	0	
			2	0	
			3	0	
	3		1	0	
			2	0	
			3	0	
	4		1	1	
			2	1	
			3	1	
	5		1	0	
			2	0	
			3	0	
16	1	1	1	0	
			2	0	
			3	0	
		2	1	0	
			2	0	
			3	0	
		3	1	0	
			2	0	
			3	0	
		4	1	0	
			2	0	
			3	0	
		5	1	0	
			2	0	
			3	0	
	2	1	1	1	
			2	1	
			3	1	
2		1	0		
		2	0		
		3	0		

		3	1	1
			2	1
			3	1
		4	1	1
			2	1
			3	1
		5	1	1
			2	1
			3	1
	3	1	1	0
			2	0
			3	0
		2	1	0
			2	0
			3	0
3		1	1	
		2	1	
		3	1	
4		1	0	
		2	0	
		3	0	
5		1	0	
		2	0	
		3	0	
4	1	1	1	
		2	1	
		3	1	
	2	1	0	
		2	0	
		3	0	
	3	1	1	
		2	1	
		3	1	
	4	1	0	
		2	0	
		3	0	
	5	1	0	
		2	0	
		3	0	
5	1	1	0	
		2	0	
		3	0	
	2	1	0	
		2	0	
		3	0	

	3	1	1
		2	0
		3	0
	4	1	0
		2	0
		3	0
	5	1	0
		2	0
		3	0

BINMELANGEUTILISE

Mélange	Cokerie	Période	Binaire	
1	1	1	1	
		2	1	
		3	1	
	2	1	1	0
			2	0
			3	1
	3	1	1	0
			2	0
			3	0
	4	1	1	0
			2	0
			3	0
	5	1	1	1
			2	1
			3	1
2	1	1	0	
		2	0	
		3	0	
	2	1	1	1
			2	1
			3	0
	3	1	1	1
			2	1
			3	1
	4	1	1	1
			2	1
			3	1
	5	1	1	1
			2	0
			3	0
3	1	1	0	

		2	0
		3	0
	2	1	1
		2	1
		3	1
	3	1	0
		2	0
		3	0
	4	1	0
		2	0
		3	0
	5	1	0
		2	0
		3	0
4	1	1	0
		2	0
		3	0
	2	1	0
		2	0
		3	0
	3	1	0
		2	0
		3	1
	4	1	1
		2	1
		3	1
	5	1	0
		2	0
		3	0
5	1	1	0
		2	0
		3	0
	2	1	0
		2	0
		3	0
	3	1	0
		2	0
		3	0
	4	1	0
		2	0
		3	0
	5	1	0
		2	0
		3	0

QDEMCOK

Client	Cokerie	Période	Quantité
1	1	1	0
		2	0
		3	0
	2	1	0
		2	0
		3	0
	3	1	11500
		2	12600
		3	12600
	4	1	0
		2	0
		3	0
	5	1	0
		2	0
		3	0
2	1	1	0
		2	4000
		3	4000
	2	1	0
		2	0
		3	0
	3	1	0
		2	0
		3	0
	4	1	0
		2	0
		3	0
	5	1	0
		2	0
		3	0
3	1	1	45000
		2	45000
		3	45000
	2	1	0
		2	0
		3	0
	3	1	0
		2	0
		3	0
	4	1	0
		2	0

		3	0
	5	1	0
		2	0
		3	0
4	1	1	0
		2	0
		3	0
	2	1	5659,654
		2	8000
		3	7954,17
	3	1	1340,346
		2	0
		3	45,83048
	4	1	0
		2	0
		3	0
	5	1	0
		2	0
		3	0
5	1	1	0
		2	0
		3	0
	2	1	0
		2	0
		3	0
	3	1	2000
		2	2000
		3	2000
	4	1	0
		2	0
		3	0
	5	1	0
		2	0
		3	0
6	1	1	14215,64
		2	3904,452
		3	2653,079
	2	1	2284,357
		2	20895,55
		3	11746,92
	3	1	0
		2	0
		3	0
	4	1	0
		2	0

		3	0
	5	1	0
		2	0
		3	0
7	1	1	0
		2	0
		3	0
	2	1	26700
		2	19400
		3	14800
	3	1	0
		2	0
		3	0
	4	1	0
		2	0
		3	0
	5	1	0
		2	0
		3	0
8	1	1	0
		2	0
		3	0
	2	1	0
		2	3500
		3	0
	3	1	0
		2	0
		3	0
	4	1	0
		2	0
		3	0
	5	1	0
		2	0
		3	0
9	1	1	6000
		2	6000
		3	5000
	2	1	0
		2	0
		3	0
	3	1	0
		2	0
		3	0
	4	1	0
		2	0

		3		0
	5	1		0
		2		0
		3		0
10	1	1		0
		2		0
		3		0
	2	1	16000	
		2	16000	
		3	14000	
	3	1		0
		2		0
		3		0
	4	1		0
		2		0
		3		0
	5	1		0
		2		0
		3		0
11	1	1		0
		2		0
		3		0
	2	1		0
		2		0
		3		0
	3	1	12000	
		2	12000	
		3	12000	
	4	1		0
		2		0
		3		0
	5	1		0
		2		0
		3		0
12	1	1		0
		2		0
		3		0
	2	1		0
		2		0
		3		0
	3	1		0
		2		0
		3		0
	4	1	58452	
		2	49002	

		3	51644
	5	1	0
		2	0
		3	0
13	1	1	0
		2	0
		3	0
	2	1	0
		2	0
		3	0
	3	1	0
		2	0
		3	0
	4	1	0
		2	0
		3	0
	5	1	68516
		2	68132
		3	71162

QTrainUtilise

Charbon	Cokerie	Période	Quantité
3	1	1	0
		2	0
		3	0
	2	1	11138,9
		2	14850,11
		3	2864,977
	3	1	0
		2	0
		3	0
	4	1	0
		2	0
		3	0
	5	1	0
		2	0
		3	0
6	1	1	25382,8
		2	22926,4
		3	22050,14
	2	1	15906,69
		2	11095,13
		3	4271,961
	3	1	0
		2	0

		3	0
	4	1	0
		2	0
		3	0
	5	1	1602,228
		2	22286,76
		3	23277,9
7	1	1	3565
		2	3220
		3	3096,929
	2	1	0
		2	0
		3	13128,25
	3	1	0
		2	0
		3	0
	4	1	0
		2	0
		3	0
	5	1	535,8623
		2	7453,765
		3	7785,252
8	1	1	0
		2	0
		3	0
	2	1	0
		2	0
		3	0
	3	1	0
		2	0
		3	0
	4	1	0
		2	0
		3	0
	5	1	0
		2	0
		3	0
9	1	1	0
		2	0
		3	0
	2	1	586,8551
		2	9229,197
		3	0
	3	1	3499,125
		2	3467,792

		3	1115,975
	4	1	7620,276
		2	6388,298
		3	6732,73
	5	1	8293,743
		2	0
		3	0
13	1	1	0
		2	0
		3	0
	2	1	0
		2	0
		3	0
	3	1	0
		2	0
		3	0
	4	1	0
		2	0
		3	0
	5	1	0
		2	0
		3	0
15	1	1	17825
		2	16100
		3	15484,65
	2	1	0
		2	0
		3	9710,244
	3	1	0
		2	0
		3	0
	4	1	0
		2	0
		3	0
	5	1	1339,656
		2	18634,41
		3	19463,13

QStockCokerie

Charbon	Cokerie	Période	Quantité
3	1	1	0
		2	0
		3	0
	2	1	14861,1

		2	2864,977
		3	0
	3	1	0
		2	23146,02
		3	49146,02
	4	1	0
		2	0
		3	0
	5	1	0
		2	0
		3	0
6	1	1	0
		2	0
		3	0
	2	1	0
		2	0
		3	0
	3	1	0
		2	0
		3	0
	4	1	0
		2	0
		3	0
	5	1	6708,284
		2	0
		3	0
7	1	1	0
		2	0
		3	0
	2	1	0
		2	9210,431
		3	0
	3	1	3245,373
		2	5614,942
		3	5614,942
	4	1	0
		2	0
		3	0
	5	1	7453,765
		2	0
		3	0
8	1	1	0
		2	0
		3	0
	2	1	0

		2	0
		3	0
	3	1	10000
		2	20000
		3	30000
	4	1	0
		2	0
		3	0
	5	1	0
		2	0
		3	0
9	1	1	0
		2	0
		3	0
	2	1	0
		2	0
		3	0
	3	1	0
		2	0
		3	13066,01
	4	1	0
		2	914,7132
		3	0
	5	1	0
		2	0
		3	0
13	1	1	0
		2	0
		3	0
	2	1	0
		2	0
		3	0
	3	1	16000
		2	32000
		3	48000
	4	1	0
		2	0
		3	0
	5	1	0
		2	0
		3	0
15	1	1	0
		2	0
		3	0
	2	1	9710,244

		2	9710,244
		3	0
	3	1	13525,1
		2	21190,69
		3	28642,91
	4	1	0
		2	0
		3	0
	5	1	0
		2	0
		3	0

Annexe 5 : Pourcentage de perte après le processus du haut-fourneau

	Cokerie 1	Cokerie 2	Cokerie 3	Cokerie 4	Cokerie 5
Entrant	197638,583	181832,471	86927,256	172269,972	226633,703
Sortant	180773,174	166940,65	80086,176	159098	207810
Perte	16865,409	14891,821	6841,08	13171,972	18823,703
Pourcentage perte	8,53%	8,19%	7,87%	7,65%	8,31%
Pourcentage sortant	91,47%	91,81%	92,13%	92,35%	91,69%