

Louvain School of Management

Gestion des déchets ménagers

Auteur : Simon Blairvacq
Promoteur : Prof. Daniel De Wolf
Année académique 2021-2022
Travail de fin d'études (TFE) en vue d'obtenir le titre de
Master (60) en Sciences de Gestion
Horaire de jour

Résumé

Ce travail traite de la gestion des déchets ménagers produits par une communauté. La problématique des déchets ménagers n'est pas récente et est toujours d'une grande importance à l'heure actuelle.

La gestion des déchets peut être optimisée économiquement, en réduisant au maximum le coût total du système, ainsi que d'un point de vue environnemental, en diminuant la quantité de déchets mise en décharge. Dans le cadre de ce travail, la mise en décharge pour déchets non triés, l'incinération avec mise en décharge des cendres résiduelles ainsi que le tri à la source et en usine seront les quatre alternatives disponibles afin de traiter les déchets. La combinaison optimale de ces alternatives sera, dès lors, étudiée d'un point de vue économique, d'un point de vue environnemental ainsi que par l'intermédiaire d'un compromis entre économie et environnement.

Suite à l'optimisation réalisée à l'aide du solveur d'Excel, il apparaît que la solution optimale d'un point de vue économique ne fait pas usage du tri en usine. La solution optimale d'un point de vue environnemental, quant à elle, ne fait pas usage de la décharge pour déchets et favorise grandement le recyclage. Enfin, la solution de compromis se base sur un mix entre les quatre alternatives proposées. De manière générale, il apparaît que, lorsqu'une diminution de la quantité de déchets mise en décharge est envisagée, le coût total du système explose.

Remerciements

Tout au long de la réalisation de ce travail de fin d'étude, j'ai reçu l'aide précieuse de nombreuses personnes auxquelles je tiens à exprimer ma reconnaissance.

Tout d'abord, je voudrais remercier mon promoteur, le professeur Daniel De Wolf, qui a donné de son temps pour répondre aux différentes questions que j'ai pu avoir tout au long de la réalisation de mon travail de fin d'étude. Le professeur De Wolf m'a également apporté de précieux conseils quant à la réalisation et l'écriture de ce travail.

Ensuite, je voudrais aussi remercier mon entourage et mes proches pour leur soutien tout au long de mes études ainsi que l'aide apportée lors de la relecture de ce travail.

Enfin, je terminerai pas un dernier mot pour les rencontres effectuées au cours de mes études et qui ont contribué à leur réussite ainsi qu'à mes cokotteurs avec lesquels nous nous sommes soutenus et conseillés tout au long de la réalisation de nos travaux de fin d'études respectifs et, de manière globale, tout au long de nos études.

Table des matières

| | |
|---|-----------|
| Liste des figures | v |
| Liste des tableaux | vi |
| 1 Introduction | 1 |
| 2 Présentation du problème | 3 |
| 2.1 La mise en décharge | 3 |
| 2.1.1 Données numériques | 4 |
| 2.2 L'incinérateur | 4 |
| 2.2.1 Données numériques | 5 |
| 2.3 Recyclage | 5 |
| 2.3.1 Données numériques | 6 |
| 3 Formulation du problème | 7 |
| 3.1 Diagramme de réseau | 7 |
| 3.2 Variables de décision | 8 |
| 3.3 Contraintes | 9 |
| 3.4 Objectifs | 10 |
| 4 Algorithme de résolution | 12 |
| 4.1 Mise en oeuvre avec le solveur d'Excel | 12 |
| 4.2 Calculs des paramètres | 12 |
| 4.2.1 Calcul des PCI | 13 |
| 4.2.2 Calcul de la fraction de cendres | 15 |
| 5 Analyse des résultats | 17 |
| 5.1 Minimisation du coût total | 17 |
| 5.2 Minimisation de la quantité mise en décharge | 20 |
| 5.3 Compromis | 23 |
| 5.4 Discussion générale | 26 |
| 5.5 Analyse de sensibilité | 27 |
| 5.5.1 Quel est le montant de la taxe immondicie en [€/kg] qui couvre l'ensemble des frais pour chacune des alternatives? | 27 |
| 5.5.2 Si dans le choix "coût minimum" contre "masse minimum mise en décharge", la masse de cendres que l'on peut mettre en décharge passe de 10% à 15% moyennant un coût additionnel de traitement des cendres de 100€ par tonne, est-ce que la ville va diminuer ses coûts totaux? | 28 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 5.5.3 | Si l'on augmente la capacité du centre de tri, cela aura-t-il un effet bénéfique sur le coût total du traitement des déchets? | 30 |
| 6 | Conclusion | 32 |
| | Bibliographie | 32 |
| | Annexes | 35 |

Table des figures

| | | |
|-----|--|----|
| 1.1 | Filières de traitements des déchets [3] | 1 |
| 2.1 | Mise en décharge | 3 |
| 2.2 | Incinérateur de déchets [7] | 4 |
| 3.1 | Diagramme de réseau | 7 |
| 5.1 | Diagramme de réseau du système sous l'objectif de minimisation du coût total | 17 |
| 5.2 | Diagramme de réseau du système sous l'objectif de minimisation de la quantité mise en décharge | 20 |
| 5.3 | Diagramme de réseau du système sous l'objectif de compromis entre la minimisation du coût total et de la quantité mise en décharge | 23 |
| 5.4 | Évolution de la quantité mise en décharge par les différentes solutions optimales en fonction de leur coût total | 26 |
| 5.5 | Rapport de sensibilité du solveur d'Excel pour la solution de compromis . . . | 28 |
| 5.6 | Rapport de sensibilité du solveur d'Excel pour la solution minimisant le coût total | 30 |
| 5.7 | Rapport de sensibilité du solveur d'Excel pour la solution minimisant la quantité mise en décharge | 31 |
| 1 | Feuille Excel de l'algorithme de résolution, partie 1 | 36 |
| 2 | Feuille Excel de l'algorithme de résolution, partie 2 | 37 |

Liste des tableaux

| | | |
|------|---|----|
| 2.1 | Caractéristiques numériques de la mise en décharge [5], [6] | 4 |
| 2.2 | Caractéristiques numériques des déchets d'une poubelle moyenne [8] | 5 |
| 2.3 | Caractéristiques numériques de l'incinérateur [9], [10], [11] | 5 |
| 2.4 | Caractéristiques numériques de la décharge pour cendres [12], [13] | 5 |
| 2.5 | Caractéristiques numériques du centre de tri [14] | 6 |
| 2.6 | Prix de revente des matériaux recyclés | 6 |
| 4.1 | Pouvoir calorifique des déchets d'une poubelle moyenne | 13 |
| 4.2 | Pouvoir calorifique des déchets d'une poubelle moyenne auxquels les métaux ont été retirés | 13 |
| 4.3 | Pouvoir calorifique des déchets non-recyclables qui composent la poubelle moyenne | 15 |
| 4.4 | Fraction de cendres des déchets d'une poubelle moyenne auxquels les métaux ont été retirés | 15 |
| 4.5 | Fraction de cendres des déchets non-recyclables qui composent la poubelle moyenne | 16 |
| 5.1 | Solution optimale de gestion des déchets sous l'objectif de minimisation du coût total | 18 |
| 5.2 | Coûts des différentes alternatives de traitement des déchets et bénéfices de vente de matériaux recyclés et d'énergie sous l'objectif de minimisation du coût total | 19 |
| 5.3 | Quantité de déchets mis en décharge sous l'objectif de minimisation du coût total | 19 |
| 5.4 | Solution optimale de gestion des déchets sous l'objectif de minimisation de la quantité mise en décharge | 21 |
| 5.5 | Coûts des différentes alternatives de traitement des déchets et bénéfices de vente de matériaux recyclés et d'énergie sous l'objectif de minimisation de la quantité mise en décharge | 21 |
| 5.6 | Quantité de déchets mise en décharge sous l'objectif de minimisation de la quantité mise en décharge | 22 |
| 5.7 | Solution optimale de gestion des déchets sous l'objectif de compromis entre la minimisation du coût total et de la quantité mise en décharge | 24 |
| 5.8 | Coûts des différentes alternatives de traitement des déchets et bénéfices de vente de matériaux recyclés et d'énergie sous l'objectif de compromis entre la minimisation du coût total et de la quantité mise en décharge | 25 |
| 5.9 | Quantité de déchets mis en décharge sous l'objectif de minimisation du coût total | 25 |
| 5.10 | Récapitulatif des résultats obtenus pour les trois différentes optimisations | 26 |
| 5.11 | Taxe immondice pour les différents systèmes optimaux | 27 |

- 5.12 Solution optimale de gestion des déchets sous l'objectif de compromis entre la minimisation du coût total et de la quantité mise en décharge avec les changements proposés par les autorités 29
- 5.13 Coûts des différentes alternatives de traitement des déchets et bénéfices de vente de matériaux recyclés et d'énergie sous l'objectif de compromis entre la minimisation du coût total et de la quantité mise en décharge avec les changements proposés par les autorités 29

Chapitre 1

Introduction

La problématique des déchets et de leur gestion ne date pas d'hier. Au XIX^e siècle, la salubrité publique et l'hygiène sont déjà prises en considération au point que des bacs sont mis à disposition des habitants pour leurs ordures ménagères. Ensuite, la révolution industrielle mène à des changements de mode de vie qui apportent des déchets moins facilement biodégradables et en quantité beaucoup plus importante [1]. Récemment, en France, bien que la quantité de déchets par individu suit une tendance à la baisse de 2% sur les 10 dernières années, il existe une augmentation continue de la quantité totale de déchets ménagers due notamment à la croissance démographique et à l'augmentation des apports en déchèterie [2]. Ce problème peut bien entendu se généraliser au niveau mondial : dans les années à venir, une quantité grandissante de déchets ménagers devra être traitée dans le respect du contexte de préoccupations environnementales croissantes tout en assurant une efficacité économique.

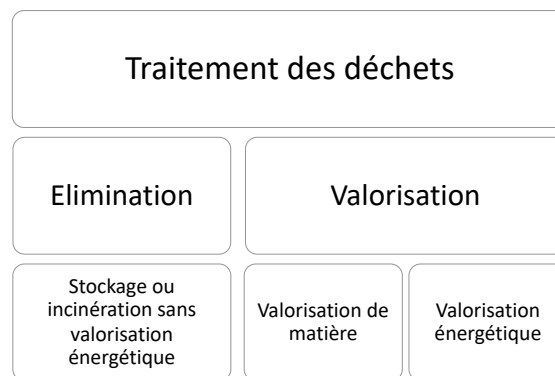


FIGURE 1.1 – Filières de traitements des déchets [3]

La gestion des déchets implique des pertes économiques et des coûts de gestion. En effet, lorsque les déchets ne sont pas bien traités, lorsque les éléments restants de produits qui ont été utilisés pour une activité ne sont pas exploités, le travail et les ressources qui ont été mises en oeuvre pour la production, la distribution et la consommation sont perdus. De plus, la gestion des déchets coûte beaucoup d'argent [4]. Il est, dès lors, primordiale de voir les déchets comme une ressource à exploiter afin de diminuer les impacts sur la santé et l'environnement [1] et, également, de diminuer la pression que génère la production des nombreux biens et services (diminution de l'extraction, de l'exploitation d'autres ressources, etc.) [4]. La figure 1.1 montre les différentes filières existantes afin de traiter les déchets ménagers. La valorisation de matière peut être du recyclage ou de la transformation des

déchets en combustible. La valorisation énergétique concerne l'incinération avec production et vente d'énergie. Il est important de ne pas oublier l'alternative de prévention, de réduction à la source [3]. Cette dernière ne sera, en revanche, pas étudiée dans le cadre de ce travail car il se limite au traitement pur des déchets ce qui suppose que ceux-ci sont déjà présents.

Ce travail se divise en cinq parties distinctes. Tout d'abord, une présentation de la problématique considérée sera faite afin de présenter les alternatives considérées pour traiter les déchets, leurs caractéristiques et, également, décrire les objectifs visés. Ensuite, la formulation mathématique du problème sera détaillée suivie de l'algorithme de résolution reprenant la structure du problème et la méthode de résolution employée. Pour finir, les résultats seront analysés en profondeur et, ceux-ci, mèneront à la conclusion générale qui pourra être tirée de ce travail.

Chapitre 2

Présentation du problème

Afin d'optimiser la gestion des déchets ménagers pour une collectivité locale produisant un total de 12 000 tonnes de déchets ménagers par an, trois alternatives sont possibles :

1. La mise en décharge
2. L'incinération
3. Le recyclage

Chacune de ces alternatives va être présentée et leurs caractéristiques respectives avec les données numériques utilisées dans le cadre de ce travail seront répertoriées.

2.1 La mise en décharge

La mise en décharge consiste en le stockage ou l'enfouissement des déchets. Il peut avoir pour conséquences la pollution de l'eau par infiltration des nappes et la pollution de l'air par dégagement de gaz. En conséquence, une couche de protection imperméable est nécessaire afin de collecter les eaux d'infiltration qui pourraient contaminer les nappes d'eau (voir figure 2.1). Ceci a pour conséquences d'augmenter les frais de mise en décharge ainsi que les coûts d'investissements et de maintenance de l'installation.

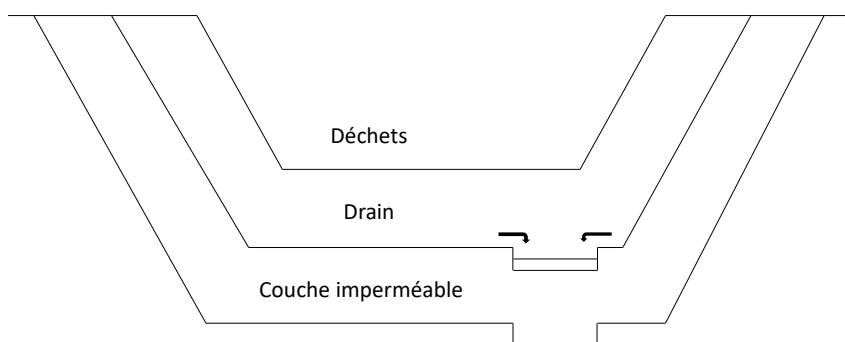


FIGURE 2.1 – Mise en décharge

2.1.1 Données numériques

Les données numériques caractéristiques de la décharge pour déchets sont présentées au tableau 2.1.

| Type de décharge | Capacité totale [t] | Frais de mise en décharge [€/t] | Coût fixe de construction [10^6 €] | Durée de vie [ans] | Capacité annuelle [t/an] |
|------------------|---------------------|---------------------------------|---------------------------------------|--------------------|--------------------------|
| Déchets | 200 000 | 52 | 38 | 30 | 6 666,67 |

TABLE 2.1 – Caractéristiques numériques de la mise en décharge [5], [6]

2.2 L'incinérateur

L'incinération consiste à brûler les déchets et à les mettre sous forme de cendres ce qui permet de réduire fortement le volume de ces déchets. Dans le cadre de ce travail, une incinération avec valorisation énergétique sera considérée. Dans ce cas, on parle d'une centrale déchets-énergie. Le procédé est le suivant (à suivre avec les numéros présent sur la figure 2.2) [7] :

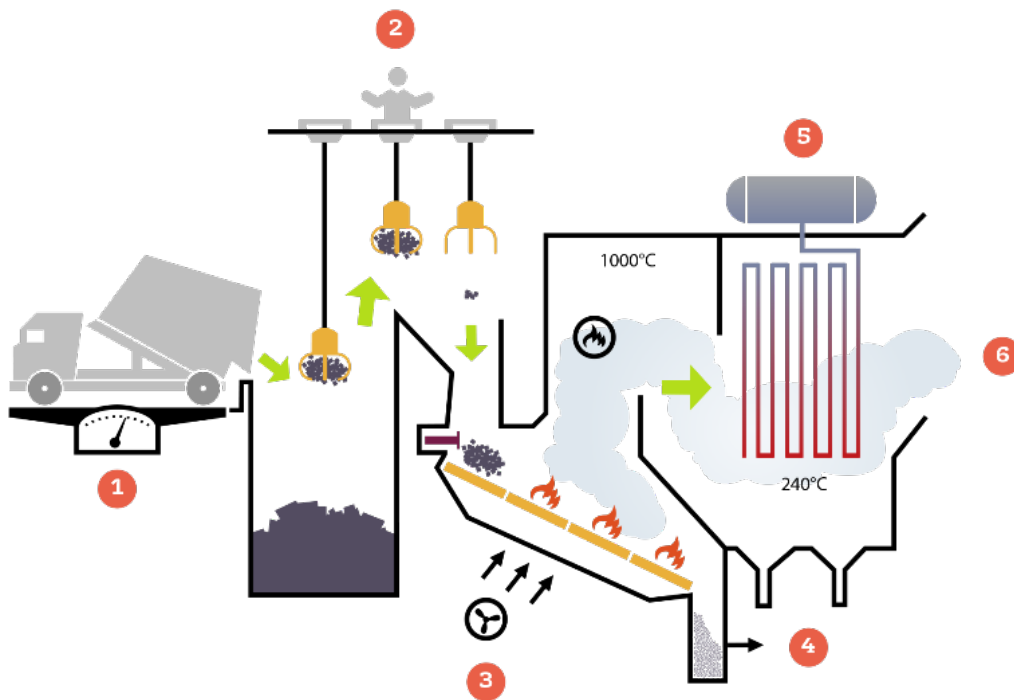


FIGURE 2.2 – Incinérateur de déchets [7]

1. réception : le camion déverse son contenu ;
2. enfournement : mise des déchets sur une trémie d'alimentation ;
3. combustion : atteinte d'une température maximale de plus de 1000 °C ;
4. les cendres : séparation des résidus solides de la combustion ;
5. chaleur - énergie - électricité : la chaleur produite par la combustion est récupérée par une chaudière et permet la production d'énergie¹ ;

1. Dans le cadre de ce travail, la chaleur produite sera directement utilisée pour la chauffage urbain et ne nécessitera donc aucune autre transformation.

6. fumées : elles sont refroidies jusqu'à 240 °C et sont traitées et filtrées.

2.2.1 Données numériques

La combustion se réalise avec un combustible équivalent à la composition typique des déchets ménagers (tableau 2.2).

| | Poids mouillé (kg) | Teneur en eau (%) | Valeur calorifique sèche (kcal/kg) | Cendre (%) |
|------------|-----------------------|----------------------|---------------------------------------|---------------|
| Nourriture | 0,29 | 72 | 4 713 | 4,5 |
| Papier | 0,25 | 10 | 4 207 | 5,4 |
| Verre | 0,13 | 0 | 0 | 100,0 |
| Plastique | 0,11 | 2 | 7 982 | 10,0 |
| Poussière | 0,10 | 3 | 2 106 | 70,0 |
| Textile | 0,08 | 10 | 4 250 | 2,2 |
| Métaux | 0,04 | 0 | 412 | 100,0 |
| | 1,00 | 24,70 | 3 607,56 | 27,93 |

TABLE 2.2 – Caractéristiques numériques des déchets d'une poubelle moyenne [8]

Les données numériques caractéristiques de l'incinérateur sont présentées au tableau 2.3.

| Incinérateur | Capacité annuelle [t] | Frais de traitement des déchets [€/t] | Coût fixe de construction [10 ⁶ €] | Durée de vie [ans] | Rendement thermique [/] |
|--------------|--------------------------|--|---|-----------------------|-------------------------------|
| Incinération | 7 500 | 150 | 78 | 40 | 0,75 |

TABLE 2.3 – Caractéristiques numériques de l'incinérateur [9], [10], [11]

Les données numériques caractéristiques de la décharge pour cendres sont présentées au tableau 2.4.

| Type de décharge | Capacité totale [t] | Frais de mise en décharge [€/t] | Coût fixe de construction [10 ⁶ €] | Durée de vie [ans] | Capacité annuelle [t/an] |
|---------------------|------------------------|---------------------------------------|---|-----------------------|--------------------------------|
| Cendres | 50 000 | 91,35 | 10 | 30 | 1 666,67 |

TABLE 2.4 – Caractéristiques numériques de la décharge pour cendres [12], [13]

2.3 Recyclage

Le recyclage peut se faire de deux manières distinctes. Premièrement, à l'aide d'un tri à la source qui nécessite un changement de comportement important des habitants mais qui a l'avantage de présenter un coût de mise en décharge extrêmement faible : seuls les déchets non-recyclables doivent être gérés. Deuxièmement, à l'aide d'un tri en usine. Les déchets sont collectés et sont séparés dans le centre de tri, ce qui a pour conséquence d'augmenter les frais de traitement des déchets.

2.3.1 Données numériques

Les données numériques caractéristiques du centre de tri sont présentées au tableau 2.5.

| Centre de tri | Capacité annuelle [t] | Frais de traitement des déchets [€/t] | Coût fixe de construction [10^6 €] | Durée de vie [ans] |
|------------------|-----------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--------------------|
| Déchets entrants | 5 000 | 300 | 2,72 | 7 |

TABLE 2.5 – Caractéristiques numériques du centre de tri [14]

Les données numériques caractéristiques de la revente de matériaux recyclés sont présentées au tableau 2.6

| Composant recyclable | Prix [€/t] |
|----------------------|------------|
| Papier | 133 |
| Plastique | 335 |
| Métaux | 255 |
| Verre | 55 |

TABLE 2.6 – Prix de revente des matériaux recyclés

Chapitre 3

Formulation du problème

3.1 Diagramme de réseau

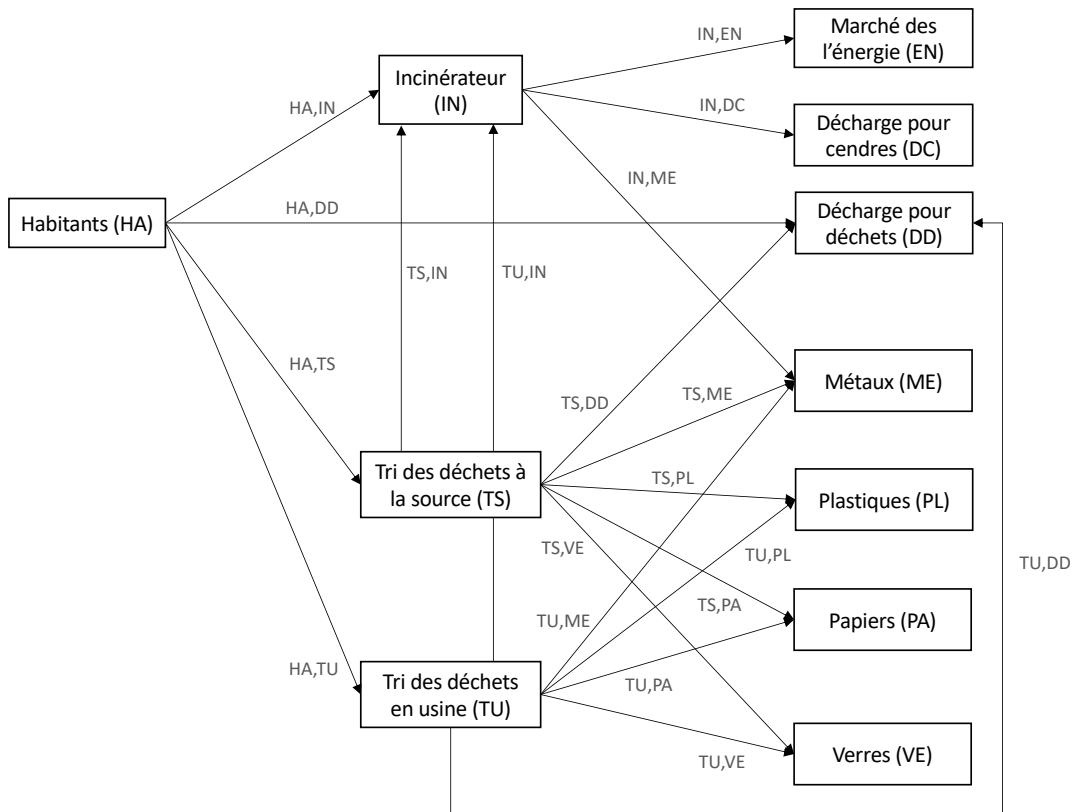


FIGURE 3.1 – Diagramme de réseau

Le graphe sur la figure 3.1 est un ensemble de couples $G(N,A)$ avec N un ensemble de noeuds et A un ensemble d'arêtes qui sont chacune un couple de noeuds (i,j) avec $i \in N$ et $j \in N$ [15]. Dans ce cas présent, on a :

$$N = \{HA, DD, IN, DC, EN, TS, TU, ME, PL, PA, VE\}$$

$$A = \{(HA,IN), (HA,DD), (HA,TS), (HA,TU), (IN,EN), (IN,DC), (IN,ME), (TS,IN), (TS,DD), (TS,ME), (TS,PL), (TS,PA), (TS,VE), (TU,IN), (TU,DD), (TU,ME), (TU,PL), (TU,PA), (TU,VE)\}$$

soit 11 noeuds et 19 arêtes.

3.2 Variables de décision

Il est important de distinguer les variables de décision indépendantes des variables de décision dépendantes. Les variables de décision indépendantes sont celles que l'optimiseur va pouvoir faire varier, celles qu'il va pouvoir manipuler afin d'obtenir la solution optimale au problème. A l'inverse, les variables de décision dépendantes vont subir l'effet des variables de décision indépendantes [16]. Un total de 19 variables de décision composent le système dont 8 sont indépendantes.

Variables indépendantes

- $q_{HA,DD}$ = quantité de déchets en tonne [t] produite par les habitants (HA) qui est traitée par une mise en décharge pour déchets (DD) ;
- $q_{HA,IN}$ = quantité de déchets en tonne [t] produite par les habitants (HA) qui est traitée par incinération (IN) ;
- $q_{HA,TS}$ = quantité de déchets en tonne [t] produite par les habitants (HA) qui est traitée par tri à la source (TS) ;
- $q_{HA,TU}$ = quantité de déchets en tonne [t] produite par les habitants (HA) qui est traitée par tri en usine (TU) ;
- $q_{TS,DD}$ = quantité de déchets en tonne [t] qui va du tri à la source (TS) vers la décharge pour déchets (DD) ;
- $q_{TS,IN}$ = quantité de déchets en tonne [t] qui va du tri à la source (TS) vers l'incinérateur (IN) ;
- $q_{TU,DD}$ = quantité de déchets en tonne [t] qui va du tri en usine (TU) vers la décharge pour déchets (DD) ;
- $q_{TU,IN}$ = quantité de déchets en tonne [t] qui va du tri en usine (TU) vers l'incinérateur (IN).

Variables dépendantes

- $q_{IN,EN}$ = quantité d'énergie (EN) en kilowattheure [kWh] produite par l'incinération (IN) ;
- $q_{IN,DC}$ = quantité de cendres résiduelles en tonne [t] envoyée en décharge pour cendres (DC) après incinération (IN) ;
- $q_{IN,ME}$ = quantité de métaux (ME) en tonne [t] séparée avant incinération (IN) ;
- $q_{TS,ME}$ = quantité de métaux (ME) en tonne [t] qui provient du tri à la source (TS) ;
- $q_{TS,PL}$ = quantité de plastiques (PL) en tonne [t] qui provient du tri à la source (TS) ;
- $q_{TS,PA}$ = quantité de papiers (PA) en tonne [t] qui provient du tri à la source (TS) ;
- $q_{TS,VE}$ = quantité de verres (VE) en tonne [t] qui provient du tri à la source (TS) ;

- $q_{TU,ME}$ = quantité de métaux (ME) en tonne [t] qui provient du tri en usine (TU) ;
- $q_{TU,PL}$ = quantité de plastiques (PL) en tonne [t] qui provient du tri en usine (TU) ;
- $q_{TU,PA}$ = quantité de papiers (PA) en tonne [t] qui provient du tri en usine (TU) ;
- $q_{TU,VE}$ = quantité de verres (VE) en tonne [t] qui provient du tri en usine (TU).

3.3 Contraintes

Afin de lister de manière claire l'ensemble des contraintes, l'ordre logique du diagramme de réseau est suivi. À savoir, la production de déchets par les habitants, suivi par l'alternative de traitement par mise en décharge pour déchets, l'incinération, le tri à domicile et, finalement, le tri en usine.

- Contrainte de traitement des déchets :

$$\sum_j q_{HA,j} = TOTAL = 12.000, \forall (HA,j) \in A$$

$$q_{HA,DD} + q_{HA,IN} + q_{HA,TS} + q_{HA,TU} = TOTAL \quad (3.1)$$

- Contrainte de capacité de la décharge pour déchets :

$$q_{HA,DD} + q_{TS,DD} + q_{TU,DD} \leq \text{cap}_{\text{annuelle,DD}} \quad (3.2)$$

- Contrainte de capacité de l'incinérateur :

$$q_{HA,IN} + q_{TS,IN} + q_{TU,IN} \leq \text{cap}_{\text{annuelle,IN}} \quad (3.3)$$

- Production d'énergie :

$$\eta_{th} \cdot ((q_{HA,IN} - q_{IN,ME}) \cdot PCI_1 + (q_{TS,IN} + q_{TU,IN}) \cdot PCI_2) = q_{IN,EN} \quad (3.4)$$

avec PCI_1 le pouvoir calorifique de la poubelle moyenne à laquelle les métaux ont été retirés et PCI_2 le pouvoir calorifique des déchets non-recyclables.

- Capacité de la décharge pour cendres :

$$q_{IN,DC} \leq \text{cap}_{\text{annuelle,DC}} \quad (3.5)$$

- Séparation des métaux avant l'incinération :

$$q_{IN,ME} = q_{HA,IN} \cdot x_{ME} \quad (3.6)$$

avec x_{ME} la fraction massique de métaux dans la poubelle moyenne.

- Quantité de cendres résiduelles après incinération :

$$q_{IN,DC} = x_{cendres,1} \cdot (q_{HA,IN} - q_{IN,ME}) + x_{cendres,2} \cdot (q_{TS,IN} + q_{TU,IN}) \quad (3.7)$$

avec $x_{cendres,1}$ la fraction massique de cendres résiduelles après incinération de la poubelle moyenne à laquelle les métaux ont été retirés et $x_{cendres,2}$ la fraction massique de cendres résiduelles après incinération des déchets non-recyclables.

- Équation de bilan sur le tri à la source :

$$q_{HA,TS} = q_{TS,IN} + q_{TS,DD} + q_{TS,ME} + q_{TS,PL} + q_{TS,PA} + q_{TS,VE} \quad (3.8)$$

— Équation de bilan sur le tri en usine :

$$q_{HA,TU} = q_{TU,IN} + q_{TU,DD} + q_{TU,ME} + q_{TU,PL} + q_{TU,PA} + q_{TU,VE} \quad (3.9)$$

— Contrainte de capacité du tri en usine :

$$q_{HA,TU} \leq \text{cap}_{\text{annuelle},TU} \quad (3.10)$$

— Taux d'acceptation du tri à la source :

$$q_{HA,TS} \leq t_{\text{acceptance},TS} \cdot TOTAL \quad (3.11)$$

avec $t_{\text{acceptance},TS}$ le taux d'acceptation du tri à domicile par la collectivité.

— Recyclage des déchets après tri à domicile :

$$q_{TS,ME} = q_{HA,TS} \cdot x_{ME} \quad (3.12)$$

$$q_{TS,PL} = q_{HA,TS} \cdot x_{PL} \quad (3.13)$$

$$q_{TS,PA} = q_{HA,TS} \cdot x_{PA} \quad (3.14)$$

$$q_{TS,VE} = q_{HA,TS} \cdot x_{VE} \quad (3.15)$$

avec x_k la fraction massique de l'élément k dans la poubelle moyenne pour $k \in K = \{ME, PL, PA, VE\}$.

— Recyclage des déchets après tri en usine :

$$q_{TU,ME} = q_{HA,TU} \cdot x_{ME} \quad (3.16)$$

$$q_{TU,PL} = q_{HA,TU} \cdot x_{PL} \quad (3.17)$$

$$q_{TU,PA} = q_{HA,TU} \cdot x_{PA} \quad (3.18)$$

$$q_{TU,VE} = q_{HA,TU} \cdot x_{VE} \quad (3.19)$$

avec x_k la fraction massique de l'élément k dans la poubelle moyenne pour $k \in K = \{ME, PL, PA, VE\}$.

3.4 Objectifs

Minimisation du coût total

Le coût total sera une addition de l'ensemble des frais de traitement des déchets aux différentes alternatives et des amortissements annuels des investissements à laquelle la vente d'énergie ainsi que la vente de matériaux recyclés seront soustraites.

$$\begin{aligned} \min CT = & \text{cout}_{DD} \cdot (q_{HA,DD} + q_{TS,DD} + q_{TU,DD}) + \text{amortissement}_{DD} \\ & + \text{cout}_{IN} \cdot (q_{HA,IN} + q_{TS,IN} + q_{TU,IN}) + \text{amortissement}_{IN} \\ & + \text{cout}_{DC} \cdot q_{IN,DC} + \text{amortissement}_{DC} \\ & + \text{cout}_{TU} \cdot q_{HA,TU} + \text{amortissement}_{TU} \\ & - \sum_{i \in \{TS, TU\}} \sum_{j \in \{ME, PL, PA, VE\}} q_{i,j} \cdot \text{prix}_j \\ & - q_{IN,ME} \cdot \text{prix}_{ME} \\ & - \text{prix}_{EN} \cdot q_{IN,EN} \end{aligned}$$

Minimisation de la quantité mise en décharge

$$\min QT = q_{IN,DC} + q_{HA,DD} + q_{TS,DD} + q_{TU,DD}$$

Compromis

La fonction objectif est indentique à la première, "minimisation du coût total".

$$\min CT$$

À cette fonction objectif, deux nouvelles contraintes doivent être rajoutées, à savoir :

— Contrainte sur la décharge de déchets non traités :

$$q_{HA,DD} + q_{TS,DD} + q_{TU,DD} \leq 0,2 \cdot TOTAL \quad (3.20)$$

— Contrainte sur la décharge de cendres :

$$q_{IN,DC} \leq 0,1 \cdot TOTAL \quad (3.21)$$

Chapitre 4

Algorithme de résolution

4.1 Mise en oeuvre avec le solveur d'Excel

La résolution du problème d'optimisation se fera à l'aide du solveur d'Excel. Deux éléments importants doivent être précisés afin d'implémenter correctement l'algorithme de résolution.

Premièrement, seul le problème d'exploitation sera traité et non le problème d'investissement. C'est-à-dire que l'on considère que les infrastructures des différentes alternatives sont déjà construites. Le coût d'amortissement, à savoir le coût d'investissement divisé par la durée de vie de l'infrastructure, fera partie du coût total, et ça, indépendamment de savoir si l'alternative est utilisée dans la solution optimale ou non. De cet élément résulte une conséquence importante : on traite un problème d'optimisation linéaire. L'algorithme de résolution consiste, donc, en l'utilisation du Simplex d'Excel.

Deuxièmement, la séparation entre les variables de décision indépendantes et dépendantes doit être claire. En effet, les variables de décision indépendantes seront directement prises en charge par le solveur d'Excel comme étant les variables de décision du problème. En revanche, le solveur d'Excel ne détermine pas directement les valeurs des variables de décision dépendantes. Celles-ci seront évaluées à l'aide de formules de calcul Excel.

Dès lors, les contraintes à entrer dans le solveur d'Excel doivent uniquement concerner celles qui vont délimiter le domaine possible des variables indépendantes. Les autres contraintes ne seront pas explicitement implémentées dans le solveur d'Excel étant donné qu'elles seront utilisées dans la feuille de calcul d'Excel afin de calculer les variables dépendantes. Pour résumer, les contraintes explicitement prises en compte par le solveur d'Excel sont les suivantes :

(3.1), (3.2), (3.3), (3.5), (3.8), (3.9), (3.10), (3.11).

Ainsi que les deux contraintes de l'objectif compromis, (3.20) et (3.21), dans le cas correspondant.

La feuille de calcul Excel utilisée afin de réaliser les différentes optimisations est représentée dans les figures 1 et 2, dans les annexes.

4.2 Calculs des paramètres

Afin d'implémenter l'algorithme de résolution sur Excel, les derniers paramètres numériques doivent être calculés. Ceux-ci sont les pouvoirs calorifiques inférieurs, PCI_1 et PCI_2 , ainsi

que les fractions de cendres après incinération $x_{cendres,1}$ et $x_{cendres,2}$.

| | Poids mouillé (kg) | Teneur en eau (%) | Valeur calorifique sèche (kcal/kg) | Cendre (%) |
|------------|-----------------------|----------------------|---------------------------------------|---------------|
| Nourriture | 0,29 | 72 | 4 713 | 4,5 |
| Papier | 0,25 | 10 | 4 207 | 5,4 |
| Verre | 0,13 | 0 | 0 | 100,0 |
| Plastique | 0,11 | 2 | 7 982 | 10,0 |
| Poussière | 0,10 | 3 | 2 106 | 70,0 |
| Textile | 0,08 | 10 | 4 250 | 2,2 |
| Métaux | 0,04 | 0 | 412 | 100,0 |
| | 1,00 | 24,70 | 3 607,56 | 27,93 |

TABLE 4.1 – Pouvoir calorifique des déchets d'une poubelle moyenne

Le tableau 4.1, rappel du tableau tableau 2.2 présenté précédemment, regroupe les différents éléments caractéristiques des déchets qui composent la poubelle moyenne. Sur base de ce tableau, les différents paramètres à calculer pourront être déterminés. Il est important de préciser que la valeur calorifique sèche¹ du combustible, égale à 3 607,56 [kcal/kg] pour la poubelle moyenne (tableau 4.1), est une moyenne pondérée par la fraction massique sèche, rapport entre le poids sec du composant et le poids sec total du combustible, des valeurs calorifiques sèches des différents composants. Par ailleurs, la fraction de cendres, égale à 27,93 [%] pour la poubelle moyenne, est une moyenne pondérée par la fraction massique humide, rapport entre le poids humide du composant et le poids humide total du combustible, des fractions de cendres des différents composants.

4.2.1 Calcul des PCI

| | Poids mouillé (kg) | Teneur en eau (%) | Poids sec (kg) | Valeur calorifique sèche (kcal/kg) | Énergie (kcal) |
|------------|-----------------------|----------------------|-------------------|--|-------------------|
| Nourriture | 0,29 | 72 | 0,0812 | 4 713 | 382,7 |
| Papier | 0,25 | 10 | 0,225 | 4 207 | 946,57 |
| Verre | 0,13 | 0 | 0,13 | 0 | 0 |
| Plastique | 0,11 | 2 | 0,1078 | 7 982 | 860,46 |
| Poussière | 0,10 | 3 | 0,097 | 2 106 | 204,28 |
| Textile | 0,08 | 10 | 0,072 | 4 250 | 306 |
| | 0,96 | 25,73 | 0,713 | 3 786,83 | 2700,01 |

TABLE 4.2 – Pouvoir calorifique des déchets d'une poubelle moyenne auxquels les métaux ont été retirés

1. La valeur calorifique sèche est exprimée en kcal par unité de masse sèche du combustible et non par unité de masse mouillée.

Premièrement, le pouvoir calorifique des déchets composant la poubelle moyenne auxquels les métaux ont été retirés, PCI_1^1 , est déterminé à l'aide du tableau 4.2.

Afin de faciliter les calculs et leur compréhension, différentes colonnes ont été ajoutées. Le *Poids sec*, pour un composant de la poubelle, est obtenu en faisant l'opération suivante :

$$m_{sec,i} = m_{mouille,i} \cdot (1 - x_{eau,i})$$

avec $x_{eau,i}$, la teneur en eau du composant i en question.

Ensuite, les valeurs calorifiques sèches des différents composants du combustible sont directement reprises du tableau 4.1. Pour obtenir la valeur calorifique sèche du combustible total, VCS_1 , la procédure est la suivante :

$$VCS_1 = \frac{\sum_{i \in I} m_{sec,i} \cdot VCS_i}{m_{sec,1}} = 3\,786,83 \text{ [kcal/kg]}$$

avec $I = \{\text{Nourriture, Papier, Verre, Plastique, Poussière, Textile}\}$ et avec VCS_i , la valeur calorifique sèche du composant i en question.

Enfin, l'*Énergie* reprend la contribution apportée par la combustion de chaque composant du combustible à l'énergie totale dégagée lors de l'incinération. Elle s'obtient de la manière suivante :

$$\begin{aligned} \text{Énergie}_i &= m_{sec,i} \cdot VCS_i \\ \text{Énergie}_1 &= m_{sec,1} \cdot VCS_1 \\ &= 0,713 \cdot 3786,83 \\ &= 2700,01 \text{ [kcal]} \end{aligned}$$

Sur base de ce qui est expliqué précédemment, les calculs réalisés afin de déterminer le pouvoir calorique sont les suivants :

$$\begin{aligned} PCI_1 &= \text{pouvoir calorifique de la poubelle moyenne sans les métaux} \\ &= \frac{\text{Énergie}_1}{m_{mouille,1}} \\ &= \frac{2\,700,01}{0,96} \\ &= 2\,812,51 \text{ [kcal/kg}_{mouille}] \\ &= 3\,268,76 \text{ [kWh/t}_{mouille}] \end{aligned}$$

avec 0,00116222 [kWh/kcal], le facteur de conversion entre kcal et kWh.

Deuxièmement, le pouvoir calorifique des déchets non-recyclables, PCI_2^2 , est déterminé à l'aide du tableau 4.3.

1. Toutes les données numériques faisant référence aux déchets composant la poubelle moyenne auxquels les métaux ont été retirés seront notées avec l'indice 1.

2. Toutes les données numériques faisant référence aux déchets non-recyclables composant la poubelle moyenne seront notées avec l'indice 2.

| | Poids mouillé (kg) | Teneur en eau (%) | Poids sec (kg) | Valeur calorifique sèche (kcal/kg) | Énergie (kcal) |
|------------|-----------------------|----------------------|-------------------|--|-------------------|
| Nourriture | 0,29 | 72 | 0,0812 | 4 713 | 382,7 |
| Poussière | 0,10 | 3 | 0,097 | 2 106 | 204,28 |
| Textile | 0,08 | 10 | 0,072 | 4 250 | 306 |
| | 0,47 | 46,77 | 0,2502 | 3 569,06 | 892,98 |

TABLE 4.3 – Pouvoir calorifique des déchets non-recyclables qui composent la poubelle moyenne

La démarche appliquée est identique à celle précédemment expliquée. Le résultat obtenu est le suivant :

$$PCI_2 = 2208,16 \text{ [kWh/t}_{\text{mouille}}]$$

4.2.2 Calcul de la fraction de cendres

Premièrement, la fraction de cendres des déchets de la poubelle moyenne auxquels les métaux ont été retirés, $x_{cendres,1}$, est déterminé à l'aide du tableau 4.4.

| | Poids mouillés (kg) | Cendre (%) |
|------------|---------------------|------------|
| Nourriture | 0,29 | 4,5 |
| Papier | 0,25 | 5,4 |
| Verre | 0,13 | 100,0 |
| Plastique | 0,11 | 10,0 |
| Poussière | 0,10 | 70,0 |
| Textile | 0,08 | 2,2 |
| | 0,96 | 24,93 |

TABLE 4.4 – Fraction de cendres des déchets d'une poubelle moyenne auxquels les métaux ont été retirés

La procédure est la suivante :

$$\begin{aligned}
 x_{cendres,1} &= \text{fraction massique de cendres résiduelles après incinération} \\
 &\quad \text{de la poubelle moyenne sans les métaux} \\
 &= \frac{\sum_{i \in I} m_{mouille,i} \cdot x_{cendres,i}}{m_{mouille,1}} \\
 &= 0,2493
 \end{aligned}$$

avec $I = \{\text{Nourriture, Papier, Verre, Plastique, Poussière, Textile}\}$

Deuxièmement, la fraction de cendres des déchets non-recyclables qui composent la poubelle moyenne, $x_{cendres,2}$, est déterminée à l'aide du tableau 4.5.

| | Poids mouillé (kcal) | Cendre (%) |
|------------|----------------------|------------|
| Nourriture | 0,29 | 4,5 |
| Poussière | 0,10 | 70,0 |
| Textile | 0,08 | 2,2 |
| | 0,47 | 18,04 |

TABLE 4.5 – Fraction de cendres des déchets non-recyclables qui composent la poubelle moyenne

La démarche appliquée est identique à celle précédemment expliquée. Le résultat obtenu est le suivant :

$$x_{cendres,2} = 0,1804$$

Chapitre 5

Analyse des résultats

5.1 Minimisation du coût total

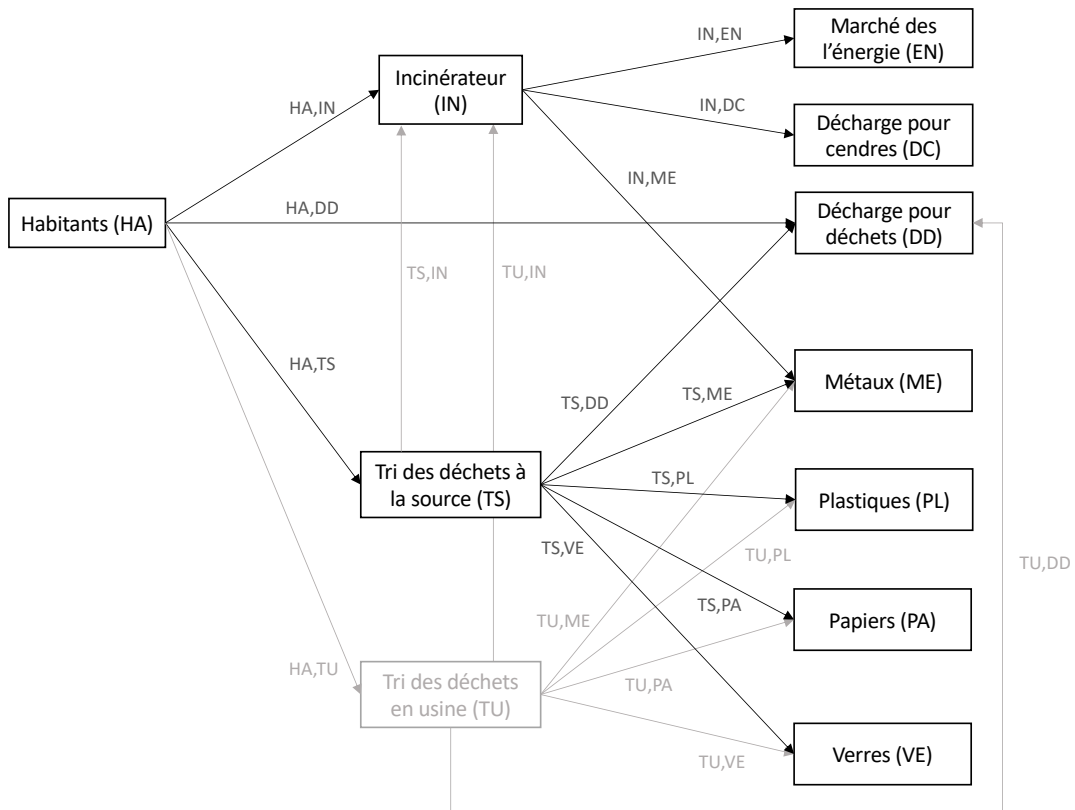


FIGURE 5.1 – Diagramme de réseau du système sous l'objectif de minimisation du coût total

La solution optimale répondant à l'objectif de minimisation du coût total du système de traitement des déchets fait usage de trois alternatives de traitement des déchets sur les quatre initialement disponibles. En effet, la décharge pour déchets, l'incinérateur ainsi que le tri à la source sont exploités alors que **le tri en usine n'est pas utilisé**. Il est également important de mentionner qu'**aucun déchet n'est envoyé du tri à la source vers l'incinérateur**. En effet, le flux qui serait composé de déchets non-recyclables comme la nourriture, la poussière et le textile, est nul. Les raisons qui poussent l'optimiseur à ne pas

faire usage de ces alternatives au profit des autres seront explicitées ci-dessous sur base des données chiffrées des résultats. Une représentation graphique de la solution via un diagramme de réseau est disponible à la figure 5.1 dans laquelle les solutions non exploitées sont éclaircies.

| | Variables de décision | Valeurs |
|---------------|-----------------------|-----------|
| Indépendantes | $q_{HA,DD}$ [t] | 715,53 |
| | $q_{HA,IN}$ [t] | 6 964,47 |
| | $q_{HA,TS}$ [t] | 4 320 |
| | $q_{HA,TU}$ [t] | 0 |
| | $q_{TS,DD}$ [t] | 2 030,4 |
| | $q_{TS,IN}$ [t] | 0 |
| | $q_{TU,DD}$ [t] | 0 |
| | $q_{TU,IN}$ [t] | 0 |
| Dépendantes | $q_{IN,EN}$ [MWh] | 16 390,92 |
| | $q_{IN,DC}$ [t] | 1 666,67 |
| | $q_{IN,ME}$ [t] | 278,58 |
| | $q_{TS,ME}$ [t] | 172,8 |
| | $q_{TS,PL}$ [t] | 475,2 |
| | $q_{TS,PA}$ [t] | 1 080 |
| | $q_{TS,VE}$ [t] | 561,6 |
| | $q_{TU,ME}$ [t] | 0 |
| | $q_{TU,PL}$ [t] | 0 |
| | $q_{TU,PA}$ [t] | 0 |
| | $q_{TU,VE}$ [t] | 0 |

TABLE 5.1 – Solution optimale de gestion des déchets sous l'objectif de minimisation du coût total

Dans un premier temps, certains points peuvent être mentionnés en ce qui concerne les variables de décision indépendantes¹ (tableau 5.1). Tout d'abord, le tri à la source est utilisé à sa capacité maximal (4320 [t]). En effet, ceci est logique car il permet de diminuer le coût du système par la revente des matériaux recyclés tout en ne nécessitant aucun frais de traitement des déchets. À l'inverse, les frais de traitement des déchets pour le tri à l'usine étant très importants, cette alternative n'est pas employée. Ensuite, l'incinérateur n'est pas utilisé à sa pleine capacité car il est, en fait, limité par la capacité de la décharge pour cendres qui, elle, est exploitée à son maximum (1666,67 [t]). Il est important de préciser que ce ne sera pas forcément toujours le cas. Dans ce cas particulier-ci, l'ensemble des déchets proviennent directement des habitants et sont ceux qui ont le pourcentage de cendres le plus élevé (24,93 %, voir tableau 4.2). Si, en revanche, des déchets proviennent à l'incinérateur après avoir été triés aussi bien à la source qu'en usine, les cendres résiduelles ne sont plus que de 18,04% (tableau 4.3). Dans ce cas-là, la capacité de l'incinérateur serait atteinte avant que la capacité de la décharge pour cendres ne le soit. Une dernière remarque relative aux déchets arrivant à l'incinérateur doit être faite concernant le fait que les déchets non-recyclables résiduels du tri à la source ne sont pas envoyés à l'incinérateur. La raison est simple. Étant donné que la capacité de la décharge de cendres est atteinte, l'envoi de déchets non-recyclables se ferait au détriment des déchets ménagers. Or, le pouvoir calorifique de ces derniers est supérieur (tableau 4.2) à celui des déchets non-recyclables (tableau 4.3). Il en résulterait donc une

1. Les variables de décision dépendantes étant une conséquence immédiate des variables de décision indépendantes, elles ne seront pas analysées en profondeur en tant que telles.

diminution de la quantité d'énergie vendue et, par conséquent, une augmentation du coût total. Enfin, la quantité résiduelle de déchets est mise en décharge car c'est une alternative présentant des frais de traitement des déchets relativement faibles.

Concernant les coûts des différentes alternatives de traitement des déchets présentés dans le tableau 5.2, il apparaît clairement que la mise en décharge de déchets, aussi bien en décharge pour déchets qu'en décharge pour cendres, contribue de manière minimale au coût total du système. L'incinérateur est le contributeur principal. Cependant, la vente d'énergie réalisée grâce à cette alternative compense largement le coût d'utilisation de l'incinérateur. Il est important de signaler que l'utilisation du système de gestion des déchets, grâce à la vente d'énergie et de matériaux recyclés, génère des bénéfices à hauteur de 1 567 750,45 [€/an] (tableau 5.2). En revanche, ces bénéfices permettent de compenser moins de 50% du coût d'amortissement annuel (3 938 571,43 [€/an], tableau 5.2). Par conséquent, l'exploitation du système de traitement des déchets reste, de manière globale, un coût d'une valeur de 2 370 820,98 [€/an].

| Composantes | Utilisation [€/an] | Amortissement [€/an] | Total [€/an] |
|-----------------------------|--------------------|----------------------|----------------|
| Décharge pour déchets | 142 788,5 | 1 266 666,67 | 1 409 455,17 |
| Décharge pour cendres | 152 250 | 333 333,33 | 485 583,33 |
| Incinérateur | 1 044 670,09 | 1 950 000 | 2 994 670,09 |
| Tri en usine | 0 | 388 571,43 | 388 571,43 |
| Vente de matériaux recyclés | - 448 821,57 | 0 | - 448 821,57 |
| Vente d'énergie | - 2 458 637,48 | 0 | - 2 458 637,48 |
| Total | - 1 567 750,45 | 3 938 571,43 | 2 370 820,98 |

TABLE 5.2 – Coûts des différentes alternatives de traitement des déchets et bénéfices de vente de matériaux recyclés et d'énergie sous l'objectif de minimisation du coût total

En dernier lieu, la quantité totale de déchets qui est mise en décharge est importante comme le montre le tableau 5.3. En effet, comme il a pu être mis en avant précédemment, les alternatives faisant un usage massif de la mise en décharge contribuent faiblement au coût total du système. Sans contrainte sur la quantité de déchets mis en décharge, il n'est, dès lors, pas surprenant de retrouver une valeur élevée.

| Composantes | Valeurs [tonne/an] |
|--------------------------------|--------------------|
| Décharge pour déchets | 715,53 |
| Décharge pour déchets après TS | 2 030,4 |
| Décharge pour déchets après TU | 0 |
| Décharge pour cendres | 1 666,67 |
| Total | 4 412,6 |

TABLE 5.3 – Quantité de déchets mis en décharge sous l'objectif de minimisation du coût total

5.2 Minimisation de la quantité mise en décharge

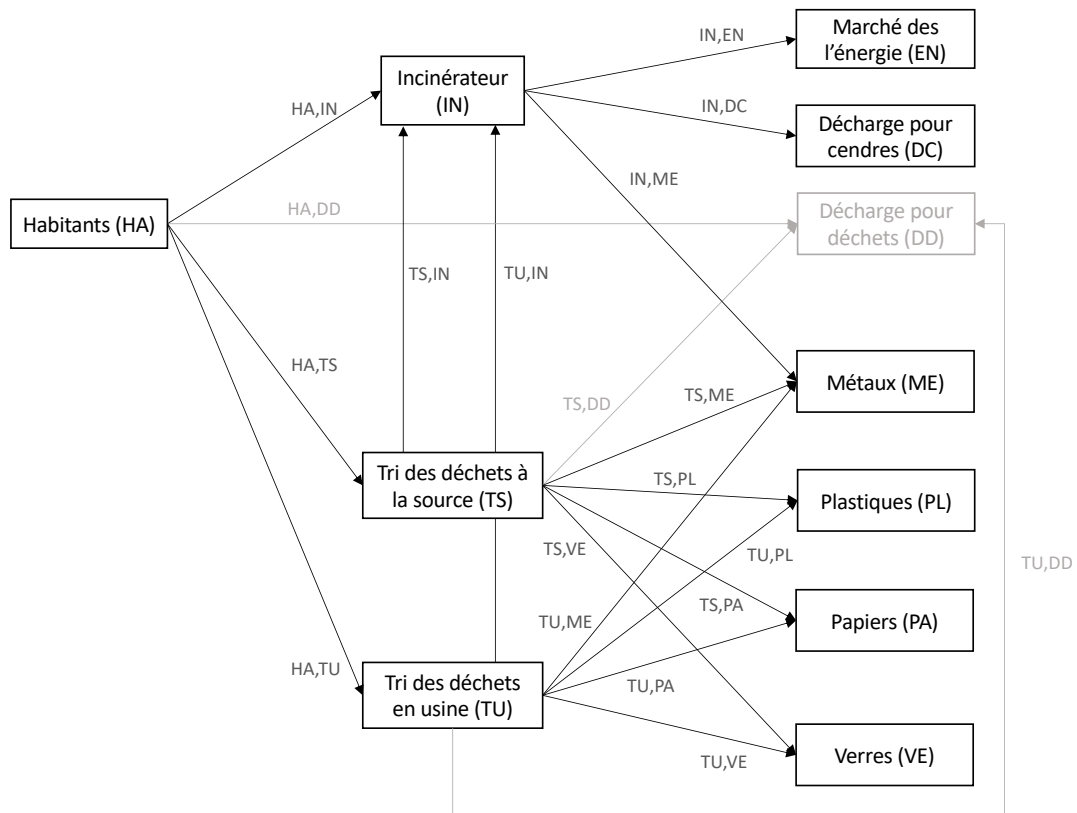


FIGURE 5.2 – Diagramme de réseau du système sous l'objectif de minimisation de la quantité mise en décharge

La solution optimale répondant à l'objectif de minimisation de la quantité mise en décharge par le système de traitement des déchets fait usage de trois alternatives de traitement des déchets sur les quatre initialement disponibles. En effet, l'incinérateur, le tri à la source ainsi que les tri en usine sont exploités alors que **la décharge pour déchets n'est, elle, pas exploitée**. Par conséquent, aucun déchet ne part directement à la décharge pour déchets mais les déchets qui ne peuvent pas être recyclés après tri à la source ou en usine (nourriture, poussière et textiles) ne partent également pas à la décharge pour déchets mais bien à l'incinérateur. Les raisons qui poussent l'optimiseur à ne pas faire usage de ces alternatives au profit des autres seront explicitées ci-dessous sur base des données chiffrées des résultats. Une représentation graphique de la solution via un diagramme de réseau est disponible à la 5.2 dans laquelle les solutions non exploitées sont éclaircies.

Dans un premier temps, certains points vont être mentionnés en ce qui concerne les variables de décision indépendantes¹ (tableau 5.4) comme il a pu être fait pour la section précédente. Tout d'abord, le tri à la source est également utilisé à sa capacité maximale (4320 [t]) ainsi que le tri en usine (5000 [t]) qui permet de ne pas mettre du tout en décharge une bonne partie des déchets. Ensuite, l'unique alternative qui n'est pas utilisée est la

1. Les variables de décision dépendantes étant une conséquence immédiate des variables de décision indépendantes, elles ne seront pas analysées en profondeur en tant que telles.

mise en décharge pour déchets. En effet, n'ayant aucune contrainte économique, il sera toujours plus intéressant de ne jeter aucun déchet dans cette décharge et de toujours privilégier, soit le recyclage, soit l'incinérateur qui permet de réduire fortement le volume de déchets. Enfin, l'incinérateur traite les déchets résiduels qui ne peuvent pas être pris en charge par le tri à la source ou le tri en usine (les déchets ménagers ainsi que les déchets non-recyclables après être passés au tri) et, ce, pour la raison précédemment expliquée.

| | Variables de décision | Valeurs |
|---------------|-----------------------|-----------|
| Indépendantes | $q_{HA,DD}$ [t] | 0 |
| | $q_{HA,IN}$ [t] | 2 680 |
| | $q_{HA,TS}$ [t] | 4 320 |
| | $q_{HA,TU}$ [t] | 5 000 |
| | $q_{TS,DD}$ [t] | 0 |
| | $q_{TS,IN}$ [t] | 2 030,4 |
| | $q_{TU,DD}$ [t] | 0 |
| | $q_{TU,IN}$ [t] | 2 350 |
| Dépendantes | $q_{IN,EN}$ [MWh] | 13 561,87 |
| | $q_{IN,DC}$ [t] | 1 431,78 |
| | $q_{IN,ME}$ [t] | 107,2 |
| | $q_{TS,ME}$ [t] | 172,8 |
| | $q_{TS,PL}$ [t] | 475,2 |
| | $q_{TS,PA}$ [t] | 1 080 |
| | $q_{TS,VE}$ [t] | 561,6 |
| | $q_{TU,ME}$ [t] | 200 |
| | $q_{TU,PL}$ [t] | 550 |
| | $q_{TU,PA}$ [t] | 1 250 |
| | $q_{TU,VE}$ [t] | 650 |

TABLE 5.4 – Solution optimale de gestion des déchets sous l'objectif de minimisation de la quantité mise en décharge

| Composantes | Utilisation [€/an] | Amortissement [€/an] | Total [€/an] |
|-----------------------------|--------------------|----------------------|----------------|
| Décharge pour déchets | 0 | 1 266 666,67 | 1 266 666,67 |
| Décharge pour cendres | 130 793,1 | 333 333,33 | 464 126,44 |
| Incinérateur | 1 059 060 | 1 950 000 | 3 009 060 |
| Tri en usine | 1 500 000 | 388 571,43 | 1 888 571,43 |
| Vente de matériaux recyclés | - 842 370 | 0 | - 842 370 |
| Vente d'énergie | - 2 034 280,96 | 0 | - 2 034 280,96 |
| Total | - 186 797,86 | 3 938 571,43 | 3 751 773,57 |

TABLE 5.5 – Coûts des différentes alternatives de traitement des déchets et bénéfices de vente de matériaux recyclés et d'énergie sous l'objectif de minimisation de la quantité mise en décharge

Deuxièmement, le tableau 5.5 met en évidence le coût élevé d'une solution qui privilégie l'impact environnemental et en particulier, dans ce cas-ci, la réduction de la quantité de déchets mise en décharge. En effet, les alternatives permettant la réduction de cette quantité comportent des coûts d'utilisation relativement importants en comparaison avec les autres

alternatives. Bien que ces alternatives génèrent également des recettes importantes, elles permettent tout juste de couvrir les frais d'utilisation. En effet, le coût total d'utilisation est négatif et d'une valeur, faible, de - 186 797,86 [€/an] (tableau 5.5) : l'utilisation du système de traitement des déchets ne génère que très peu de bénéfices. Dès lors, ces bénéfices d'utilisation sont marginaux par rapport au coût d'amortissement du système. Il en résulte donc un coût total du système d'une valeur de 3 751 773,57 [€/an], soit du même ordre de grandeur que le coût d'amortissement du système (3 938 571,43 [€/an]).

| Composantes | Valeurs [tonne/an] |
|--------------------------------|--------------------|
| Décharge pour déchets | 0 |
| Décharge pour déchets après TS | 0 |
| Décharge pour déchets après TU | 0 |
| Décharge pour cendres | 1 431,78 |
| Total | 1 431,78 |

TABLE 5.6 – Quantité de déchets mise en décharge sous l'objectif de minimisation de la quantité mise en décharge

Pour finir, le tableau 5.6 met en avant la faible quantité de déchets mis en décharge qui est la valeur minimale qui peut être atteinte. L'unique contributeur est la décharge pour cendres comme il a pu être expliqué précédemment.

5.3 Compromis

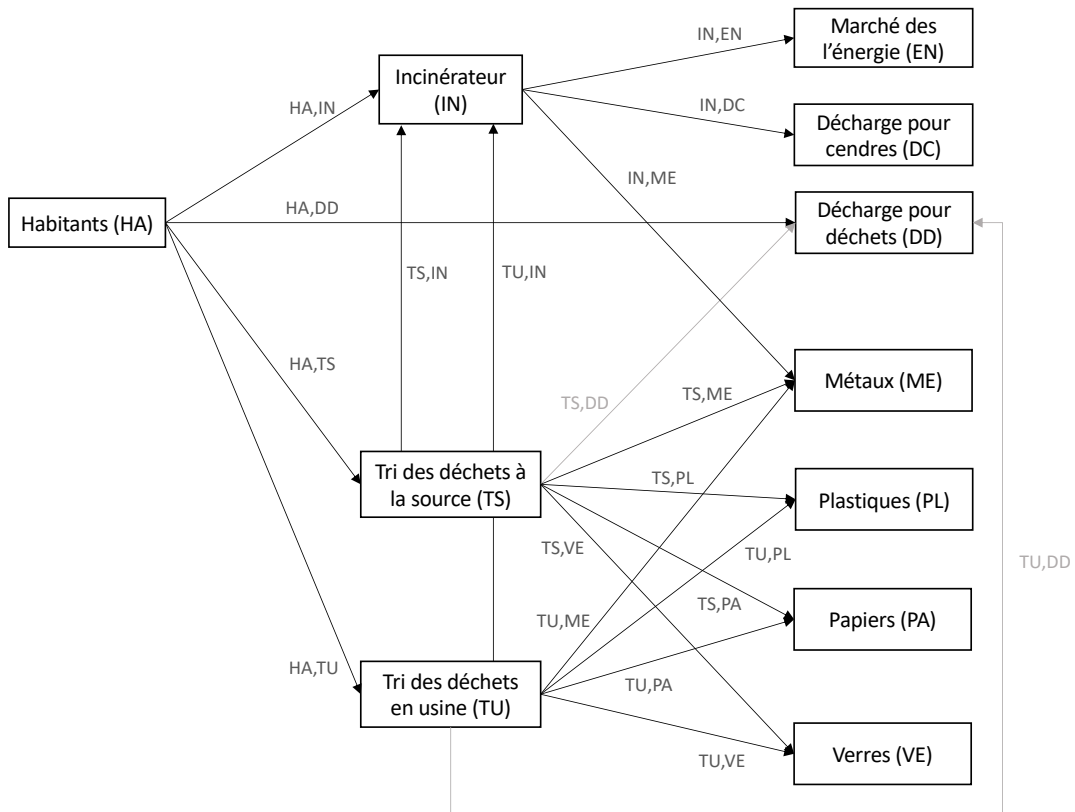


FIGURE 5.3 – Diagramme de réseau du système sous l'objectif de compromis entre la minimisation du coût total et de la quantité mise en décharge

La solution optimale répondant à l'objectif de compromis entre la minimisation du coût total et la minimisation de la quantité mise en décharge pour le système de traitement des déchets **fait usage de l'ensemble des quatre alternatives de traitement des déchets**. Seuls deux flux possibles de déchets ne sont pas employés, à savoir les déchets non-recyclables (nourriture, poussière et textile) qui ne sont pas envoyés à la décharge pour déchets mais bien uniquement à l'incinérateur après tri aussi bien à la source qu'en usine. Les raisons qui poussent l'optimiseur à ne pas faire usage de ces alternatives au profit des autres seront explicitées ci-dessous sur base des données chiffrées des résultats. Une représentation graphique de la solution via un diagramme de réseau est disponible à la 5.3 dans laquelle les solutions non exploitées sont éclaircies.

| | Variables de décision | Valeurs |
|---------------|-----------------------|----------|
| Indépendantes | $q_{HA,DD}$ [t] | 2 400 |
| | $q_{HA,IN}$ [t] | 2 497,24 |
| | $q_{HA,TS}$ [t] | 4 320 |
| | $q_{HA,TU}$ [t] | 2 782,76 |
| | $q_{TS,DD}$ [t] | 0 |
| | $q_{TS,IN}$ [t] | 2 030,4 |
| | $q_{TU,DD}$ [t] | 0 |
| | $q_{TU,IN}$ [t] | 1 307,9 |
| Dépendantes | $q_{IN,EN}$ [MWh] | 11 405,9 |
| | $q_{IN,DC}$ [t] | 1 200 |
| | $q_{IN,ME}$ [t] | 99,89 |
| | $q_{TS,ME}$ [t] | 172, 8 |
| | $q_{TS,PL}$ [t] | 475, 2 |
| | $q_{TS,PA}$ [t] | 1 080 |
| | $q_{TS,VE}$ [t] | 561, 6 |
| | $q_{TU,ME}$ [t] | 111, 31 |
| | $q_{TU,PL}$ [t] | 306, 1 |
| | $q_{TU,PA}$ [t] | 695, 69 |
| | $q_{TU,VE}$ [t] | 361, 76 |

TABLE 5.7 – Solution optimale de gestion des déchets sous l’objectif de compromis entre la minimisation du coût total et de la quantité mise en décharge

Dans un premier temps, certains points vont être mentionnés en ce qui concerne les variables de décision indépendantes¹ (tableau 5.7) comme il a pu être fait pour les sections précédentes. Tout d’abord, comme ça a pu être le cas dans toutes les différentes situations, le tri à la source est utilisé à sa capacité maximale et, ce, pour la même raison qu’avec l’objectif de minimisation du coût total : il permet de diminuer le coût du système par la revente des matériaux recyclés tout en ne nécessitant aucun frais de traitement des déchets. Ensuite, les contraintes qui ont été rajoutées sur les deux décharges font que, aussi bien la décharge pour déchets (2400 [t]) que la décharges pour cendres (1200 [t]), atteignent la quantité maximale autorisée par les autorités qui peut être mise en décharge. Les raisons peuvent s’expliquer par les éléments suivants :

- l’incinérateur, tout d’abord, bien que pas utilisé à sa capacité maximale, est limité par la masse limite de cendres qui peut être mise dans la décharge pour cendres ;
- dès lors, la quantité de déchets résiduels part en direction de la décharge pour déchets. Comme il a pu être expliqué dans la section relative à l’optimisation du coût total, cette alternative présente des frais de traitement des déchets faibles par rapport au tri en usine ;
- pour finir, dans ce cas-ci, la nouvelle limite imposée sur la quantité de déchets mis en décharge pour déchets est atteinte avant que tous les déchets ne soient traités. Pour cette raison, le tri en usine prend le relais afin de traiter la quantité de déchets résiduelle.

Enfin, contrairement à ce qui a pu être mis en avant dans le cas de l’optimisation du coût total, les déchets non-recyclables issus du tri à la source ainsi que du tri à l’usine sont envoyés

1. Les variables de décision dépendantes étant une conséquence immédiate des variables de décision indépendantes, elles ne seront pas analysées en profondeur en tant que telles.

vers l'incinérateur. Les nouvelles contraintes sur les capacités des décharges font que l'envoi de déchets en décharge pour déchets doit être dans un premier temps limité. Les déchets non-recyclables générant peu de cendres (tableau 4.3), les envoyer à l'incinérateur permet de, à la fois, réduire la quantité de déchets mise en décharge pour satisfaire les contraintes et, également, de conserver une solution économiquement avantageuse.

| Composantes | Utilisation [€/an] | Amortissement [€/an] | Total [€/an] |
|-----------------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| Décharge pour déchets | 124 800 | 1 266 666,67 | 1 391 466,67 |
| Décharge pour cendres | 109 620 | 333 333,33 | 442 953,33 |
| Incinérateur | 875 330,8 | 1 950 000 | 2 825 330,8 |
| Tri en usine | 834 827,18 | 388 571,43 | 1 223 398,61 |
| Vente de matériaux recyclés | - 646 608 | 0 | - 646 608 |
| Vente d'énergie | - 1 710 885,18 | 0 | - 1 710 885,18 |
| Total | - 412 915,21 | 3 938 571,43 | 3 525 656,22 |

TABLE 5.8 – Coûts des différentes alternatives de traitement des déchets et bénéfices de vente de matériaux recyclés et d'énergie sous l'objectif de compromis entre la minimisation du coût total et de la quantité mise en décharge

Le tableau 5.8 détaille l'ensemble des différentes composantes du coût total du système. Les deux décharges ont une contribution faible. Cependant, étant donné qu'une limite sur la quantité de déchets qui peut être mise dans ces décharges a été imposée par les autorités en comparaison avec le cas de simple optimisation du coût total, le tri en usine devient un contributeur majeur au coût total au côté de l'incinérateur. De plus, bien que la vente de matériaux aie augmenté, les bénéfices générés par la vente d'énergie ont diminué d'autant plus fort suite à la nouvelle restriction sur la quantité de cendres en décharge. En fin de compte, le coût d'utilisation du système reste négatif mais d'une valeur faible : - 412 915,21 [€/an]. Les bénéfices réalisés sont donc faibles en comparaison au coût d'amortissement du système. Par conséquent, le coût total du système, 3 525 656,22 [€/an], reste relativement proche du coût d'amortissement total (3 938 571,43 [€/an]).

| Composantes | Valeurs [tonne/an] |
|--------------------------------|--------------------|
| Décharge pour déchets | 2 400 |
| Décharge pour déchets après TS | 0 |
| Décharge pour déchets après TU | 0 |
| Décharge pour cendres | 1 200 |
| Total | 3 600 |

TABLE 5.9 – Quantité de déchets mis en décharge sous l'objectif de minimisation du coût total

En dernier lieu, le tableau 5.9 présente la quantité totale de déchets mise en décharge qui correspond simplement à la somme des limites imposées par les autorités pour la quantité de déchets mise dans chaque décharge étant donné qu'elles sont atteintes.

5.4 Discussion générale

| | Objectif 1 | Objectif 2 | Objectif 3 |
|-------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Coût total du système [€] | 2 370 820,98 | 3 751 773,57 | 3 525 656,22 |
| Quantité mise en décharge [t] | 4 412,60 | 1 431,78 | 3 600 |

TABLE 5.10 – Récapitulatif des résultats obtenus pour les trois différentes optimisations

Différents éléments peuvent être soulignés après l'analyse des trois cas d'optimisation différents précédemment discutés et repris dans le tableau 5.10. Premièrement, une optimisation du coût total permet de réduire de 37% le coût total du système, soit de 1 380 952,59 [€/an], par rapport à un système qui optimise la quantité mise en décharge. Inversement, une optimisation de la quantité mise en décharge permet de réduire de 68% la quantité de déchets mise en décharge par le système, soit de 2 980,82 [t], par rapport à un système qui optimise le coût total. La solution de compromis a permis de diminuer de 18% la quantité de déchets mise en décharge par rapport à la solution qui optimise le coût total. En revanche, elle a augmenté le coût total du système de 33%. Ceci mène à la deuxième remarque qui peut être mise en avant. Comme la figure 5.4 le montre, l'imposition de contraintes sur la quantité de déchets que l'on s'autorise à mettre en décharge, comme c'est le cas pour la situation de compromis, mène à une solution nettement plus coûteuse et dont le prix tend rapidement vers celui de la solution qui minimise la quantité mise en décharge. En effet, le fait de reposer abondamment sur des solutions coûteuses telles que l'incinérateur dans une moindre mesure et, de manière plus importante, le tri à la source augmente le prix de manière drastique.

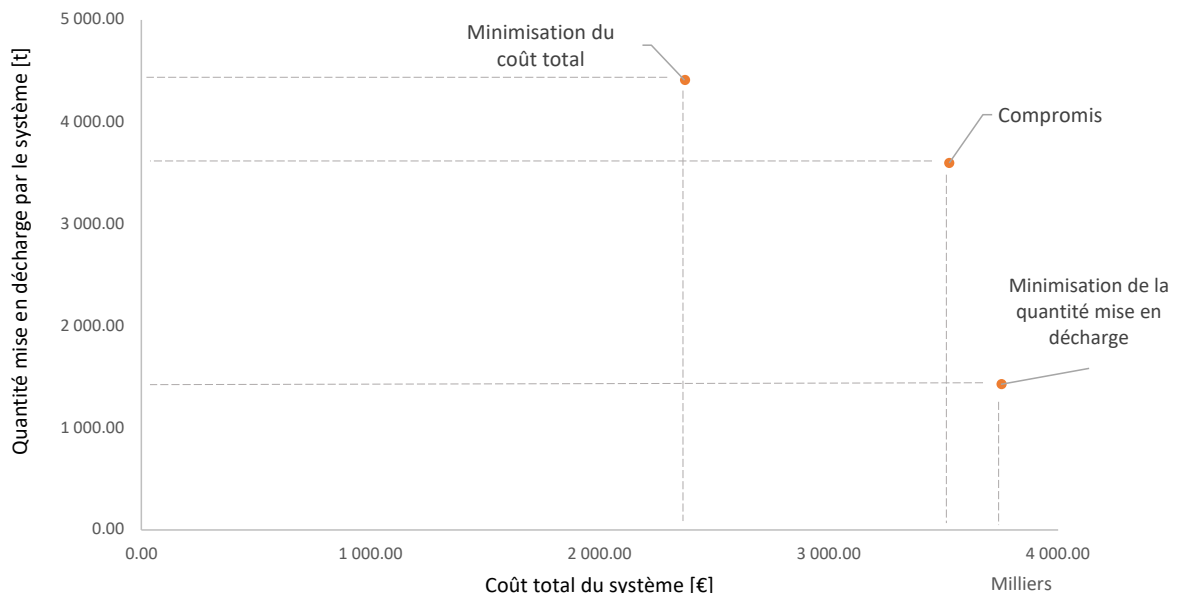


FIGURE 5.4 – Évolution de la quantité mise en décharge par les différentes solutions optimales en fonction de leur coût total

De manière générale, il n'existe pas de relation linéaire entre le coût total du système et la quantité de déchets mise en décharge. À partir du moment où une diminution d'un

des deux critères sera réalisée, bien que minime, elle mènera à une augmentation rapide et importante de l'autre critère. Dès lors, la solution de compromis semble un choix difficilement envisageable, en tout cas sur le long terme. En effet, dans le cas étudié dans le cadre de ce travail, le compromis vise à optimiser le coût du système tout en respectant de nouvelles contraintes environnementales sur la capacité des décharges. Or, il apparaît que, dès qu'une réduction de la quantité de déchets mise en décharge est envisagée, même minime, le coût total du système explose rapidement pour tendre vers celui de la solution qui minimise la quantité totale mise en décharge. Par conséquent, il sera potentiellement plus avantageux d'opter pour cette dernière solution qui ne génère une augmentation supplémentaire du coût de seulement 6% par rapport à la solution de compromis mais qui assure une sécurité à long terme grâce à une réduction supplémentaire très importante de la quantité de déchets mise en décharge (- 60%).

5.5 Analyse de sensibilité

Par l'intermédiaire de cette section, une réponse aux questions suivantes, posées par les membres du conseil d'administration de la collectivité locale, va être apportée :

- Quel est le montant de la taxe immondice en [€/kg] qui couvre l'ensemble des frais pour chacune des alternatives ?
- Si dans le choix "coût minimum" contre "masse minimum mise en décharge", la masse de cendres que l'on peut mettre en décharge passe de 10% à 15% moyennant un coût additionnel de traitement des cendres de 100 € par tonne, est-ce que la ville va diminuer ses coûts totaux ?
- Si l'on augmente la capacité du centre de tri, cela aura-t-il un effet bénéfique sur le coût total du traitement des déchets ?

5.5.1 Quel est le montant de la taxe immondice en [€/kg] qui couvre l'ensemble des frais pour chacune des alternatives ?

La réponse à cette première question est assez simple et les éléments nécessaires pour y répondre ainsi que le montant de la taxe pour les différents systèmes optimaux sont repris dans tableau 5.11.

| | Coût total [€/an] | Quantité de déchets à traiter [t] | Taxe immondice [€/kg] |
|------------|-------------------|-----------------------------------|-----------------------|
| Objectif 1 | 2 370 820,98 | 12 000 | 0,198 |
| Objectif 2 | 3 751 773,57 | 12 000 | 0,313 |
| Objectif 3 | 3 525 656,22 | 12 000 | 0,294 |

TABLE 5.11 – Taxe immondice pour les différents systèmes optimaux

Dans le cas où les autorités opteraient pour la solution minimisant le coût total, la taxe immondice s'élèverait à 0,2 € par kg de déchet. Si l'option minimisant la quantité mise en décharge est choisie, la taxe immondice s'élèverait à 0,31 € par kg de déchet. Pour la solution de compromis, la taxe immondice s'élèverait, alors, à 0,29 € par kg de déchet.

5.5.2 Si dans le choix "coût minimum" contre "masse minimum mise en décharge", la masse de cendres que l'on peut mettre en décharge passe de 10% à 15% moyennant un coût additionnel de traitement des cendres de 100€ par tonne, est-ce que la ville va diminuer ses coûts totaux ?

Pour quantifier la situation, les autorités envisagent de passer de 1200 [t] à 1800 [t] la masse de cendres que l'on peut mettre en décharge contre une augmentation à 191,35 [€/t] des frais de traitement des cendres.

Cellules variables

| Cellule | Nom | finale Valeur | réduit Coût | objectif Coefficient | admissible Augmentation | admissible Diminution |
|---------|---------|------------------|----------------|-------------------------|----------------------------|--------------------------|
| \$C\$73 | q_HA,DD | 2400 | 0 | 52 | 29.78602086 | 1E+30 |
| \$C\$74 | q_HA,IN | 2497.242718 | 0 | -191.3649516 | 365.4057472 | 48.11892298 |
| \$C\$75 | q_HA,TS | 4320 | 0 | -87.45 | 300 | 1E+30 |
| \$C\$76 | q_HA,TU | 2782.757282 | 0 | 212.55 | 1E+30 | 78.18027032 |
| \$C\$77 | q_TS,DD | 0 | 29.78602086 | 52 | 1E+30 | 29.78602086 |
| \$C\$78 | q_TS,IN | 2030.4 | 0 | -81.93447756 | 29.78602086 | 1E+30 |
| \$C\$79 | q_TU,DD | 0 | 29.78602086 | 52 | 1E+30 | 29.78602086 |
| \$C\$80 | q_TU,IN | 1307.895922 | 0 | -81.93447756 | 36.28308922 | 166.3410007 |

Contraintes

| Cellule | Nom | finale Valeur | Ombre Coût | Contrainte à droite | admissible Augmentation | admissible Diminution |
|---------|---|------------------|---------------|------------------------|----------------------------|--------------------------|
| \$G\$73 | Contrainte de traitement des déchets | 12000 | 374.6237174 | 12000 | 1431.465463 | 1796.565125 |
| \$G\$74 | Capacité de la décharge pour déchets | 2400 | 0 | 6666.666667 | 1E+30 | 4266.666667 |
| \$G\$75 | Capacité de l'incinérateur | 5835.538641 | 0 | 7500 | 1E+30 | 1664.461359 |
| \$G\$76 | Capacité de la décharge pour cendres | 1200 | 0 | 1666.666667 | 1E+30 | 466.6666667 |
| \$G\$77 | Bilan sur le tri à la source | 4320 | 344.8376965 | 0 | 1898.420941 | 2030.4 |
| \$G\$78 | Bilan sur le tri en usine | 2782.757282 | 344.8376965 | 0 | 1898.420941 | 844.3856086 |
| \$G\$79 | Capacité du tri en usine | 2782.757282 | 0 | 5000 | 1E+30 | 2217.242718 |
| \$G\$80 | Taux d'acceptaion du tri à la source | 4320 | -300 | 4320 | 2782.757282 | 2217.242718 |
| \$G\$81 | Limite sur la décharge de déchets non traités | 2400 | -322.6237174 | 2400 | 1796.565125 | 1431.465463 |
| \$G\$82 | Limite sur la décharge de cendres | 1200 | -2365.085742 | 1200 | 429.936 | 342.564 |

FIGURE 5.5 – Rapport de sensibilité du solveur d'Excel pour la solution de compromis

La figure 5.5 reprend le rapport de sensibilité du solveur d'Excel pour la solution de compromis dont il est question dans le cas présent. Dans un premier temps, la ligne qui nous intéresse est la dernière qui traite de la contrainte "Limite sur la décharge de cendres". Le prix caché a une valeur de - 2 365,08 [€/an], ce qui signifie qu'une augmentation d'une unité de la limite sur la décharge pour cendres résulte en une diminution de 2 365,08 [€/an] pour le coût total du système. Dès lors, il apparaît que compter sur une plus grande limite pour la masse de cendres qui peut être mise en décharge permet de faire baisser les coûts totaux. En revanche, la prudence quant à cette conclusion doit être de mise et, ce, pour deux raisons :

1. l'augmentation admissible est égale à 429,936 [t]. Le prix caché de - 2 365,08 [€/an] est donc uniquement valable pour une limite sur la décharge pour cendres inférieur à 1 629,936 [t] (et supérieure à 857,44 [t] au regard de la diminution admissible), ce qui est inférieur à ce qui est autorisé par les autorités ;
2. l'augmentation des frais de traitement des cendres n'est pas prise en compte.

En conséquence des deux raisons précédemment présentées, une nouvelle optimisation doit être effectuée afin de pouvoir évaluer si un gain sur le coût total peut être réalisé suite à un changement des deux paramètres comme présenté ci-dessus.

Les résultats sont présentés dans les tableaux 5.12 et 5.13.

Premièrement, il est important de remarquer, à l'aide du tableau 5.12, que la quantité de cendres mise en décharge bute sur la capacité de la décharge de cendres (1 666,67 [t]) et non sur la limite fixée par les autorités (1 800 [t]). Il est, en effet, inutile de fixer des limites sur la masse de cendres qui peut être mise en décharge supérieures à la capacité disponible en décharge.

| | Variables de décision | Valeurs |
|---------------|-----------------------|-----------|
| Indépendantes | $q_{HA,DD}$ [t] | 1 776 |
| | $q_{HA,IN}$ [t] | 5 904 |
| | $q_{HA,TS}$ [t] | 4 320 |
| | $q_{HA,TU}$ [t] | 0 |
| | $q_{TS,DD}$ [t] | 624 |
| | $q_{TS,IN}$ [t] | 1 406,4 |
| | $q_{TU,DD}$ [t] | 0 |
| | $q_{TU,IN}$ [t] | 0 |
| Dépendantes | $q_{IN,EN}$ [MWh] | 16 224,27 |
| | $q_{IN,DC}$ [t] | 1 666,67 |
| | $q_{IN,ME}$ [t] | 236,16 |
| | $q_{TS,ME}$ [t] | 172,8 |
| | $q_{TS,PL}$ [t] | 475,2 |
| | $q_{TS,PA}$ [t] | 1 080 |
| | $q_{TS,VE}$ [t] | 561,6 |
| | $q_{TU,ME}$ [t] | 0 |
| | $q_{TU,PL}$ [t] | 0 |
| | $q_{TU,PA}$ [t] | 0 |
| | $q_{TU,VE}$ [t] | 0 |

TABLE 5.12 – Solution optimale de gestion des déchets sous l'objectif de compromis entre la minimisation du coût total et de la quantité mise en décharge avec les changements proposés par les autorités

| Composantes | Utilisation [€/an] | Amortissement [€/an] | Total [€/an] |
|-----------------------------|--------------------|----------------------|----------------|
| Décharge pour déchets | 124 800 | 1 266 666,67 | 1 391 466,67 |
| Décharge pour cendres | 318 916,67 | 333 333,33 | 652 250 |
| Incinérateur | 1 096 560 | 1 950 000 | 3 046 560 |
| Tri en usine | 0 | 388 571,43 | 388 571,43 |
| Vente de matériaux recyclés | - 438 004,81 | 0 | - 438 004,81 |
| Vente d'énergie | - 2 433 640,58 | 0 | - 2 433 640,58 |
| Total | - 1 331 368,72 | 3 938 571,43 | 2 607 202,71 |

TABLE 5.13 – Coûts des différentes alternatives de traitement des déchets et bénéfices de vente de matériaux recyclés et d'énergie sous l'objectif de compromis entre la minimisation du coût total et de la quantité mise en décharge avec les changements proposés par les autorités

Deuxièmement, comme il apparaît dans le tableau 5.13, l'augmentation de la limite fixée pour la quantité de cendres mise en décharge permet de ne pas avoir besoin d'utiliser le

tri en usine. En effet, ceci permet à l'incinérateur de traiter une quantité plus importante de déchets et, par la suite, la décharge pour déchets non-traités a la capacité de traiter la quantité résiduelle de déchets. Par conséquent, bien que les frais de traitement des cendres aient été augmentés, une économie sur les coûts totaux a pu être réalisée : coût total de 2 607 202,71 [€/an] contre 3 525 656,22 [€/an] précédemment.

5.5.3 Si l'on augmente la capacité du centre de tri, cela aura-t-il un effet bénéfique sur le coût total du traitement des déchets ?

Les trois systèmes optimaux répondant aux différents objectifs d'optimisation vont être analysés un par un.

Minimisation du coût total

Le prix caché de la contrainte de capacité du tri en usine est nul comme le montre la figure 5.6. Il n'y a donc aucun effet bénéfique d'une augmentation de la capacité du centre de tri. En effet, le centre de tri n'étant pas du tout utilisé, une augmentation de la capacité n'aurait aucun sens.

Cellules variables

| Cellule | Nom | finale Valeur | réduit Coût | objectif Coefficient | admissible Augmentation | admissible Diminution |
|---------|---------|------------------|----------------|-------------------------|----------------------------|--------------------------|
| \$C\$73 | q_HA,DD | 715.5327121 | 0 | 52 | 184.99 | 55.53997678 |
| \$C\$74 | q_HA,IN | 6964.467288 | 0 | -181.1649516 | 55.53997678 | 1E+30 |
| \$C\$75 | q_HA,TS | 4320 | 0 | -87.45 | 115.01 | 1E+30 |
| \$C\$76 | q_HA,TU | 0 | 184.99 | 212.55 | 1E+30 | 184.99 |
| \$C\$77 | q_TS,DD | 2030.4 | 0 | 52 | 41.87878298 | 1E+30 |
| \$C\$78 | q_TS,IN | 0 | 41.87878298 | -81.93447756 | 1E+30 | 41.87878298 |
| \$C\$79 | q_TU,DD | 0 | 0 | 52 | 41.87878298 | 393.5957447 |
| \$C\$80 | q_TU,IN | 0 | 41.87878298 | -81.93447756 | 1E+30 | 41.87878298 |

Contraintes

| Cellule | Nom | finale Valeur | Ombre Coût | Contrainte à droite | admissible Augmentation | admissible Diminution |
|---------|--------------------------------------|------------------|---------------|------------------------|----------------------------|--------------------------|
| \$G\$73 | Contrainte de traitement des déchets | 12000 | 52 | 12000 | 3920.733955 | 715.5327121 |
| \$G\$74 | Capacité de la décharge pour déchets | 2745.932712 | 0 | 6666.666667 | 1E+30 | 3920.733955 |
| \$G\$75 | Capacité de l'incinérateur | 6964.467288 | 0 | 7500 | 1E+30 | 535.5327121 |
| \$G\$76 | Capacité de la décharge pour cendres | 1666.666667 | -974.3218071 | 1666.666667 | 128.1583333 | 938.2708427 |
| \$G\$77 | Bilan sur le tri à la source | 4320 | 52 | 0 | 3920.733955 | 2030.4 |
| \$G\$78 | Bilan sur le tri en usine | 0 | 52 | 0 | 3920.733955 | 0 |
| \$G\$79 | Capacité du tri en usine | 0 | 0 | 5000 | 1E+30 | 5000 |
| \$G\$80 | Taux d'acceptaion du tri à la source | 4320 | -115.01 | 4320 | 715.5327121 | 4320 |

FIGURE 5.6 – Rapport de sensibilité du solveur d'Excel pour la solution minimisant le coût total

Minimisation de la quantité mise en décharge

Tout d'abord, il est important de rappeler que l'objectif de cette optimisation était de minimiser la quantité de déchets mise en décharge. Le rapport de sensibilité analysera donc l'impact que peuvent avoir des changements de paramètres sur la quantité de déchets mise en décharge et non sur le coût total du système comme ça peut être le cas pour les deux autres optimisations.

Ensuite, la figure 5.7 présentant le rapport de sensibilité, présente un prix caché de - 0,15 [t/an] pour la contrainte de capacité du centre de tri. Cela signifie qu'une augmentation d'une unité de la capacité du centre de tri permettrait de réduire de 0,15 [t/an] la quantité de déchets mise en décharge. Il paraît évident que le recyclage, à la source ou en usine, sera toujours utilisé à son maximum si l'objectif est de réduire cette quantité de déchets mise en décharge.

Cellules variables

| Cellule | Nom | finale Valeur | réduit Coût | objectif Coefficient | admissible Augmentation | admissible Diminution |
|---------|---------|------------------|----------------|-------------------------|----------------------------|--------------------------|
| \$C\$73 | q_HA,DD | 0 | 0.76069 | 1 | 1E+30 | 0.76069 |
| \$C\$74 | q_HA,IN | 2680 | 0 | 0.23931 | 0.76069 | 0.1545 |
| \$C\$75 | q_HA,TS | 4320 | 0 | 0 | 0.1545 | 1E+30 |
| \$C\$76 | q_HA,TU | 5000 | 0 | 0 | 0.1545 | 1E+30 |
| \$C\$77 | q_TS,DD | 0 | 0.819553191 | 1 | 1E+30 | 0.819553191 |
| \$C\$78 | q_TS,IN | 2030.4 | 0 | 0.180446809 | 0.328723404 | 1E+30 |
| \$C\$79 | q_TU,DD | 0 | 0.819553191 | 1 | 1E+30 | 0.819553191 |
| \$C\$80 | q_TU,IN | 2350 | 0 | 0.180446809 | 0.328723404 | 1E+30 |

Contraintes

| Cellule | Nom | finale Valeur | Ombre Coût | Contrainte à droite | admissible Augmentation | admissible Diminution |
|---------|--------------------------------------|------------------|---------------|------------------------|----------------------------|--------------------------|
| \$G\$73 | Contrainte de traitement des déchets | 12000 | 0.23931 | 12000 | 439.6 | 2680 |
| \$G\$74 | Capacité de la décharge pour déchets | 0 | 0 | 6666.666667 | 1E+30 | 6666.666667 |
| \$G\$75 | Capacité de l'incinérateur | 7060.4 | 0 | 7500 | 1E+30 | 439.6 |
| \$G\$76 | Capacité de la décharge pour cendres | 1431.78 | 0 | 1666.666667 | 1E+30 | 234.8866667 |
| \$G\$77 | Bilan sur le tri à la source | 4320 | 0.180446809 | 0 | 439.6 | 2030.4 |
| \$G\$78 | Bilan sur le tri en usine | 5000 | 0.180446809 | 0 | 439.6 | 2350 |
| \$G\$79 | Capacité du tri en usine | 5000 | -0.1545 | 5000 | 2680 | 829.4339623 |
| \$G\$80 | Taux d'acceptaion du tri à la source | 4320 | -0.1545 | 4320 | 2680 | 829.4339623 |

FIGURE 5.7 – Rapport de sensibilité du solveur d'Excel pour la solution minimisant la quantité mise en décharge

Enfin, étant donné qu'une augmentation de la capacité du centre de tri résulterait en une utilisation plus important de celui-ci dans un objectif de minimisation de la quantité mise en décharge et que cette alternative est très coûteuse, il en résulterait une augmentation du coût total du système. En revanche, le coût total n'étant pas l'intérêt de cette optimisation, cela n'aurait aucun impact sur le choix qui pourrait être fait par les autorités locales.

Compromis

Le prix caché de la contrainte de capacité du tri en usine est nul comme le montre la figure 5.5. Il n'y a donc aucun effet bénéfique d'une augmentation de la capacité du centre de tri. En effet, le centre de tri n'étant pas utilisé à sa capacité maximale, une augmentation de la capacité n'aurait aucun sens.

Chapitre 6

Conclusion

L'objectif de ce travail était d'optimiser la gestion des déchets ménagers générés par une communauté. Trois objectifs d'optimisation différents ont été étudiés : minimisation du coût total du système, minimisation de la quantité mise en décharge ainsi qu'un compromis entre les deux situations. L'algorithme d'optimisation implémenté sur Excel et exploité par le solveur d'Excel permet de définir le système de traitement des déchets optimal en fonction de l'objectif recherché.

Chacun des trois objectifs mène à un système différent. Tout d'abord, la minimisation du coût total mène à un système qui ne fait pas usage du centre de tri. Le coût total du système s'élève à 2 370 820,98 [€/an], coût bien inférieur à ce qui est atteint par les deux autres systèmes optimaux. En revanche, la quantité de déchets mise en décharge est importante, à savoir 4 412,6 [t/an]. Ensuite, la minimisation de la quantité mise en décharge mène au système avec le coût le plus élevé : 3 751 773,57 [€/an]. Ce système fait un usage massif du recyclage mais n'exploite pas du tout la décharge pour déchets non-triés. D'un autre côté, une réduction très importante de la quantité de déchets mise en décharge a été atteinte. En effet, seulement 1 431,78 [t/an] de déchets sont mises en décharge. Enfin, la solution de compromis combine l'ensemble des différentes alternatives de traitement des déchets. Elle mène à un coût total de 3 525 656,22 [€/an], soit un coût du système relativement proche de la solution minimisant la quantité mise en décharge, pour une quantité de 3 600 [t/an] de déchets mise en décharge.

Il est intéressant de revenir sur les taxes immondiées relatives à chacun des trois systèmes optimaux. Celles-ci sont de 0,2 [€/kg], 0,31 [€/kg] et 0,29 [€/kg] pour, respectivement, le système minimisant le coût total, celui-ci minimisant la quantité mise en décharge et le compromis. La prise de connaissance de ces taxes est importante pour les décideurs car elles représentent directement l'impact sur les membres de la collectivité du choix d'un système de traitement des déchets plutôt qu'un autre.

Pour conclure, il apparaît que, lorsqu'une diminution de la quantité de déchets mise en décharge est envisagée, le coût total du système explose. En effet, le coût total de la solution de compromis tend vers celui de la solution minimisant la quantité mise en décharge. Par conséquent, avec l'augmentation des considérations environnementales et climatiques, toute communauté est amenée à réduire son impact environnemental. Il serait, dès lors, judicieux d'envisager d'opter pour la solution qui minimise la quantité de déchets mis en décharge.

Bibliographie

- [1] Agence de la transition écologique - ADEME Expertises. (2022). *Économie circulaire, Déchets, De quoi parle-t-on ?, Prévention et gestion des déchets*. En ligne <https://expertises.ademe.fr/economie-circulaire/dechets/quoi-parle-t/prevention-gestion-dechets>
- [2] Ouest-France. (2021). *Du fait de sa population grandissante, la France produit toujours plus de déchets ménagers*. En ligne <https://www.ouest-france.fr/environnement/dechets/du-fait-de-sa-population-grandissante-la-france-produit-toujours-plus-de-dechets-menagers-7193334>
- [3] Agence de la transition écologique - ADEME Expertises. (2021). *Economie circulaire, Déchets, De quoi parle-t-on ?, Prévention et gestion des déchets, le traitement des déchets*. En ligne <https://expertises.ademe.fr/economie-circulaire/dechets/quoi-parle-t/prevention-gestion-dechets/traitement-dechets>
- [4] Agence européenne pour l'environnement. (2021). *Les déchets : un problème ou une ressource ?*. En ligne <https://www.eea.europa.eu/fr/signaux/signaux-2014/articles/les-dechets-un-probleme-ou>
- [5] Véronique REIX. (2006). *Le prix de la mise en décharge des déchets non dangereux générés par les collectivités en 2005*. ADEME.
- [6] Le Dauphiné. (2018). *Un avis défavorable pour le centre d'enfouissement des ordures ménagères*. Journal du 12/02/2018.
- [7] Veolia. (n.d.) *Unité de valorisation énergétique*. En ligne <https://www.decheterie-pro-grenoble.veolia.fr/unite-de-valorisation-energetique>
- [8] ADEME. (2009). *Campagne nationale de caractérisation des ordures ménagères*. Résultats année 2007.
- [9] Christine MANCHERON. (2011). *Enquête sur les prix de l'incinération*. ADEME.
- [10] Aube Durable. (2018). *Tout savoir sur le projet d'incinérateur*.
- [11] Planète énergies. (2014). *L'incinération : le pouvoir calorifique des ordures*. En ligne <https://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/l-incineration-le-pouvoir-calorifique-des-ordures>
- [12] Omni Conseil. (2018). *Gestion des mâchefers issus des déchets genevois*. Rapport version 4.1.
- [13] La Dépêche. (2019). *Le futur centre d'enfouissement s'ouvre aux élus et responsables associatifs*. Journal du 13/10/2019, Saint Géraud.
- [14] Éco-Emballages. (2005). *Concevoir, construire et exploiter un centre de tri*.
- [15] Wikipédia. (2022). *Graphes (mathématiques discrètes)*. En ligne [https://fr.wikipedia.org/wiki/Graphe_\(math%C3%A9matiques_discr%C3%A8tes\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Graphe_(math%C3%A9matiques_discr%C3%A8tes))

- [16] Voxco. (n.d.). *Introduction aux variables indépendantes et aux variables dépendantes*. En ligne <https://www.voxco.com/fr/blog/introduction-aux-variables-indpendantes-et-aux-variables-dependantes/>

Annexes

Alternatives de traitements des déchets

1. Mise en décharge

| Type de décharges | Capacité totale (tonne) | Frais de mise en décharge (€/tonne) | Coûts fixes de construction (10 ⁶ €) | Durée de vie (ans) | Capacité annuelle (tonne/an) | Amortissements annuels (10 ⁶ €/an) |
|-----------------------|-------------------------|-------------------------------------|---|--------------------|------------------------------|---|
| Décharge pour déchets | 200 000 000 | 52,000 | 38,000 | 30,000 | 6 666,667 | 1,267 |
| Décharge de cendres | 50 000 000 | 191,350 | 10,000 | 30,000 | 1 666,667 | 0,333 |

2. Tri des déchets et recyclage

| Type de tri | Capacité annuelle (tonne/an) | Frais de traitement des déchets (€/tonne) | Coûts fixes de construction (10 ⁶ €) | Durée de vie (ans) | Amortissements annuels (10 ⁶ €/an) |
|-----------------------|------------------------------|---|---|--------------------|---|
| Centre de tri (usine) | 5 000 000 | 300,000 | 2,720 | 7,000 | 0,389 |
| Tri à la source | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |

| Composante recyclable | Prix (€/tonne) |
|-----------------------|----------------|
| Papier | 133,000 |
| Plastique | 335,000 |
| Métaux | 255,000 |
| Verre | 55,000 |

| | |
|--------------------|-------|
| Taux d'acceptation | 0,360 |
|--------------------|-------|

3. Incinérateur

| | | | | | | | | | | | |
|------------------------------|-----------|---|---------|---|--------|--------------------|--------|---|-------|---------------------|-------|
| Capacité annuelle (tonne/an) | 7 500 000 | Frais de traitement des déchets (€/tonne) | 150,000 | Coûts fixes de construction (10 ⁶ €) | 78,000 | Durée de vie (ans) | 40,000 | Amortissements annuels (10 ⁶ €/an) | 1,950 | Rendement thermique | 0,750 |
|------------------------------|-----------|---|---------|---|--------|--------------------|--------|---|-------|---------------------|-------|

| | |
|---------------------------|-------|
| Prix de l'énergie (€/kWh) | 0,150 |
|---------------------------|-------|

| Poubelle Moyenne | | | | | | | | | | |
|------------------|-------------------|-----------------|----------------------|------------------------------------|------------|--|--|--|--|--|
| | Teneur en eau (%) | Poids secs (kg) | Pourcentage massique | Valeur calorifique sèche (kcal/kg) | Cendre (%) | | | | | |
| Non-recyclable | 0,290 | 0,720 | 0,081 | 0,108 | 4 713,000 | | | | | |
| Nourriture | 0,100 | 0,090 | 0,097 | 0,129 | 2 106,000 | | | | | |
| Poussière | 0,080 | 0,100 | 0,072 | 0,096 | 4 250,000 | | | | | |
| Textiles | 0,100 | 0,225 | 0,225 | 0,299 | 4 207,000 | | | | | |
| Papier | 0,130 | 0,000 | 0,130 | 0,173 | 0,000 | | | | | |
| Verre | 0,110 | 0,020 | 0,108 | 0,143 | 7 982,000 | | | | | |
| Plastique | 0,040 | 0,000 | 0,040 | 0,053 | 412,000 | | | | | |
| Métaux | 1,000 | 0,247 | 0,753 | 1,000 | 3 607,559 | | | | | |
| Poubelle moyenne | | | | | 0,279 | | | | | |

| Poubelle moyenne après séparation des métaux | | | | | | | | | | |
|--|-------------------|-----------------|----------------------|------------------------------------|------------|--|--|--|--|--|
| | Teneur en eau (%) | Poids secs (kg) | Pourcentage massique | Valeur calorifique sèche (kcal/kg) | Cendre (%) | | | | | |
| Non-recyclable | 0,290 | 0,720 | 0,081 | 0,114 | 4 713,000 | | | | | |
| Nourriture | 0,100 | 0,090 | 0,097 | 0,136 | 2 106,000 | | | | | |
| Poussière | 0,080 | 0,100 | 0,072 | 0,101 | 4 250,000 | | | | | |
| Textiles | 0,100 | 0,225 | 0,225 | 0,316 | 4 207,000 | | | | | |
| Papier | 0,130 | 0,000 | 0,130 | 0,182 | 0,000 | | | | | |
| Verre | 0,110 | 0,020 | 0,108 | 0,151 | 7 982,000 | | | | | |
| Plastique | 0,060 | 0,257 | 0,713 | 1,000 | 3 786,833 | | | | | |
| Poubelle moyenne | | | | | 0,249 | | | | | |

| | | | |
|----------------------|-----------|------------------------|-----------|
| PCI (kcal/kg_humide) | 2 812,513 | PCI (kWh/tonne_humide) | 3 268,759 |
|----------------------|-----------|------------------------|-----------|

| Déchets non-recyclables | | | | | | | | | | |
|-------------------------|-------------------|-----------------|----------------------|------------------------------------|------------|--|--|--|--|--|
| | Teneur en eau (%) | Poids secs (kg) | Pourcentage massique | Valeur calorifique sèche (kcal/kg) | Cendre (%) | | | | | |
| Non-recyclable | 0,290 | 0,720 | 0,081 | 0,325 | 4 713,000 | | | | | |
| Nourriture | 0,100 | 0,090 | 0,097 | 0,388 | 2 106,000 | | | | | |
| Poussière | 0,080 | 0,100 | 0,072 | 0,288 | 4 250,000 | | | | | |
| Textiles | 0,100 | 0,225 | 0,225 | 0,468 | 3 569,055 | | | | | |
| Papier | 0,130 | 0,000 | 0,130 | 1,000 | 0,000 | | | | | |
| Verre | 0,110 | 0,020 | 0,108 | 1,000 | 7 982,000 | | | | | |
| Plastique | 0,040 | 0,000 | 0,040 | 1,000 | 412,000 | | | | | |
| Métaux | 1,000 | 0,247 | 0,753 | 1,000 | 3 607,559 | | | | | |
| Poubelle moyenne | | | | | 0,249 | | | | | |

| | | | |
|----------------------|-----------|------------------------|-----------|
| PCI (kcal/kg_humide) | 1 899,952 | PCI (kWh/tonne_humide) | 2 208,163 |
|----------------------|-----------|------------------------|-----------|

FIGURE 1 – Feuille Excel de l'algorithme de résolution, partie 1

Optimisation

Total des déchets (tonne) 12 000.000

| Variables de décision indépendantes | Valeurs |
|-------------------------------------|----------------|
| q_HA,DD | 1 775.999 |
| q_HA,IN | 5 904.001 |
| q_HA,TS | 4 320.000 |
| q_HA,TU | 0.000 |
| q_TS,DD | 624.001 |
| q_TS,IN | 1 406.399 |
| q_TU,DD | 0.000 |
| q_TU,IN | 0.000 |
| q_IN,EN | 16 224 270.554 |
| q_IN,DC | 1 666.667 |
| q_IN,ME | 236.160 |
| q_TS,ME | 172.800 |
| q_TS,PL | 475.200 |
| q_TS,PA | 1 080.000 |
| q_TS,VE | 561.600 |
| q_TU,ME | 0.000 |
| q_TU,PL | 0.000 |
| q_TU,PA | 0.000 |
| q_TU,VE | 0.000 |

| Contraintes | Valeurs | Vérifications |
|---------------------------------|---------------------------------------|-----------------|
| 1 | Contrainte de traitement des déchets | 12 000.000 VRAI |
| 2 | Capacité de la décharge pour déchets | 2 400.000 VRAI |
| 3 | Capacité de l'incinérateur | 7 310.400 VRAI |
| 4 | Capacité de la décharges pour cendres | 1 666.667 VRAI |
| 5 | Bilan sur le tri à la source | 4 320.000 VRAI |
| 6 | Bilan sur le tri en usine | 0.000 VRAI |
| 7 | Capacité du tri en usine | 0.000 VRAI |
| 8 | Taux d'acceptation du tri à la source | 4 320.000 VRAI |
| Compromis 1 | | |
| Décharge de déchets non traités | | 2 400.000 VRAI |
| Décharge de cendres | | 1 666.667 VRAI |
| Compromis 2 | | |
| Décharge de déchets non traités | | 2 400.000 VRAI |
| Décharge de cendres | | 1 666.667 VRAI |

Note : les autres contraintes ne sont pas explicites et sont utilisées afin d'évaluer les variables de décision dépendantes

| Objectifs | Composantes | Utilisation | Amortissements | Valeurs |
|-----------|--|--------------------------------|----------------------|----------------------|
| 1 | Minimisation des coûts totaux | Décharge pour déchets | 124 800.000 | 1 391 466.667 |
| | | Décharge pour cendres | 318 916.667 | 652 250.000 |
| | | Incinérateur | 1 096 560.000 | 3 046 560.000 |
| | | Tri en usine | 0.000 | 388 571.429 |
| | | Vente de matériaux recyclés | 438 004.806 | 438 004.806 |
| | TOTAL | -1 331 368.723 | 3 938 571.429 | 2 607 202.706 |
| 2 | Minimisation de la quantité de déchets mis en décharge | Décharge pour déchets | / | 1 775.999 |
| | | Décharge pour déchets après TS | / | 624.001 |
| | | Décharge pour déchets après TU | / | 0.000 |
| | | Décharge pour cendres | / | 1 666.667 |
| | TOTAL | / | / | 4 066.667 |
| 3 | Compromis | | 3 938 571.429 | 2 607 202.706 |
| | TOTAL | -1 331 368.723 | 3 938 571.429 | 2 607 202.706 |

FIGURE 2 – Feuille Excel de l'algorithme de résolution, partie 2

Ce travail traite de la gestion des déchets ménagers produits par une communauté. La problématique des déchets ménagers n'est pas récente et est toujours d'une grande importance à l'heure actuelle.

La gestion des déchets peut être optimisée économiquement, en réduisant au maximum le coût total du système, ainsi que d'un point de vue environnemental, en diminuant la quantité de déchets mise en décharge. Dans le cadre de ce travail, la mise en décharge, l'incinération ainsi que le tri à la source et en usine seront les quatre alternatives disponibles afin de traiter les déchets. La combinaison optimale de ces alternatives sera, dès lors, étudiée d'un point de vue économique, d'un point de vue environnemental ainsi que par l'intermédiaire d'un compromis entre économie et environnement.

Suite à l'optimisation réalisée à l'aide du solveur d'Excel, il apparaît que la solution optimale d'un point de vue économique ne fait pas usage du tri en usine. La solution optimale d'un point de vue environnemental, quant à elle, ne fait pas usage de la décharge pour déchets et favorise grandement le recyclage. Enfin, la solution de compromis se base sur un mix entre les quatre alternatives proposées. De manière générale, il apparaît que, lorsqu'une diminution de la quantité de déchets mise en décharge est envisagée, le coût total du système explose.

This work deals with the management of household waste produced by a community. The problem of household waste is not recent and is still of great importance today.

Waste management can be optimized economically, by minimizing the total cost of the system, as well as from an environmental point of view, by reducing the amount of waste going to landfill. As part of this work, landfilling, incineration and sorting at source and in the factory will be the four alternatives available for waste treatment. The optimal combination of these alternatives will therefore be studied from an economic point of view and from an environmental point of view as well as through a compromise between economy and environment.

Following the optimization carried out using the Excel solver, it appears that the optimal solution from an economic point of view does not make use of sorting in the factory. The optimal solution from an environmental point of view, on the other hand, does not make use of the landfill for waste and greatly promotes recycling. Finally, the compromise solution is based on a mix between the four alternatives proposed. In general, it appears that, when a reduction in the quantity of waste going to landfill is envisaged, the total cost of the system explodes.

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