

Louvain School of Management

Investissement dans la gestion des déchets

Auteurs : Etienne CLAISSE et Antoine VERSLYPE
Promoteur : Daniel DE WOLF
Année académique 2019-2020
Master [60] en sciences de gestion

Remerciements

La réalisation de ce mémoire n'aurait pas été possible sans le soutien de plusieurs personnes, que nous tenons à mettre en évidence dans cette section.

Nous remercions ainsi notre entourage qui nous a apporté un précieux recul sur notre travail ; nos camarades d'étude qui nous ont soutenu moralement ; l'Université Catholique de Louvain pour ses infrastructures et le cursus qu'elle nous a permis de réaliser ; et bien évidemment notre promoteur Monsieur De Wolf, pour sa confiance et son suivi attentif tout au long de cette entreprise.

Résumé

Ce travail tente de résoudre un problème d'optimisation de gestion des déchets. Cette résolution est envisagée en fonction de plusieurs objectifs distincts.

Pour ce faire, il se réfère à trois possibilités de gestion des déchets: la mise en décharge, le recyclage et l'incinération. Pour chaque objectif, nous cherchons à déterminer la répartition optimale des flux de déchets entre ces trois unités compte tenu des contraintes.

La première partie se charge de décrire le problème et formuler notre modèle. Cette formulation s'effectue en trois étapes: l'énumération des variables, la définition des objectifs et enfin celle des contraintes.

Le premier objectif est la minimisation du coût total; le second celle de la mise en décharge; le dernier étant pour sa part un compromis des deux. Leurs résultats ont été comparés sur les aspects économique et écologique. Une analyse de sensibilité a enfin été dressée pour compléter l'analyse.

Table des Matières

Remerciements	i
Résumé	ii
1 Introduction	1
2 Description du problème	3
2.1 Alternatives pour le traitement des déchets	3
2.2 Problématique	5
2.3 Choix de l'objectif	5
2.4 Données numériques	6
2.4.1 Caractéristiques des déchets	6
2.4.2 Mise en décharge	7
2.4.3 Incinérateur	7
2.4.4 Recyclage	8
3 Formulation du modèle	9
3.1 Représentation par un diagramme de réseau	9
3.2 Choix des indices	10
3.3 Choix des variables de contrôle	10
3.3.1 Variables provenant des habitants	11
3.3.2 Variables provenant du tri à la source	11
3.3.3 Variables provenant du tri à l'usine	11
3.3.4 Variables provenant de l'incinérateur	12
3.3.5 Variables indicatrices	12
3.4 Expression des objectifs	12
3.4.1 Minimisation du coût total	12
3.4.2 Minimisation de la mise en décharge	14
3.4.3 Minimisation du coût total avec contrainte sur la mise en décharge .	14
3.5 Expression des contraintes	14

4	Résultats et interprétations	20
4.1	Analyse comparative de l'aspect économique	20
4.2	Analyse comparative de l'aspect écologique	22
4.3	Perspective à long terme	24
5	Analyse de sensibilité	26
5.1	Taxes d'immondice	26
5.2	Modification de la restriction sur la décharge de cendres	27
5.3	Modification de la capacité du centre de tri	29
5.3.1	Objectif 1 : minimisation du coût total	29
5.3.2	Objectif 2 : minimisation de la mise en décharge	29
5.3.3	Objectif 3 : minimisation du coût total avec restrictions sur les décharges	31
6	Conclusion	33
	Annexes	36
6.1	Code GAMS	36
6.2	Analyse des conséquences de la contrainte sur les déchets envoyés en décharge	41
6.3	Modification de la capacité du centre de tri vers une capacité non-restrictive	42
6.4	Modification de la restriction sur la décharge de cendres	43

Liste des tableaux

2.1	Caractéristiques des déchets.	6
2.2	Capacités et coûts des décharges.	7
2.3	Capacité et coûts de l'incinérateur.	7
2.4	Prix de vente des différents composants recyclables.	8
2.5	Capacité et coûts du centre de tri.	8
3.1	Coûts fixes de construction.	13
3.2	Coûts variables des activités (une valeur négative représente un gain). . . .	13
3.3	Coût induit par l'incinérateur.	14
3.4	Les deux compositions de déchets pour respectivement le flux HA-IN et les flux TS-IN et TU-IN.	17
4.1	Les coûts totaux en fonction de l'objectif.	20
4.2	Les variables indicatrices en fonction de l'objectif.	21
4.3	Comparaison du coût associé à l'objectif 1 avec $y_{TU} = 0$ ou avec un centre de tri (forcé) fonctionnant à son maximum.	21
4.4	Les quantités de déchets mises en décharge en fonction de l'objectif.	22
4.5	Analyse des conséquences de l'équation 3.3 sur les quantités envoyées en décharge de déchets.	23
4.6	Analyse des conséquences de l'équation 3.4 sur les quantités envoyées en décharge de cendres.	24
4.7	Évolution des capacités exploitées (en tonnes) et du surcoût pour une période supérieure à 30 années.	25
5.1	La taxe d'immondice pour chaque objectif.	26
5.2	Descriptif des quantités de tonnes de cendres des deux possibilités pour l'objectif 3.	28
5.3	Comparaison des objectifs 1 et 3 suite à la modification de la restriction sur la décharge de cendres.	28
5.4	Les capacités exploitées et maximales du centre de tri associées à l'objectif 2 ainsi que le prix caché de l'équation 3.19.	29

5.5	Comparaison du coût et des quantités mises en décharge associés à l'objectif 2 avec une capacité illimitée du centre de tri.	30
5.6	Les capacités exploitées et maximales du centre de tri associées à l'objectif 2 où la capacité devient non-restrictive.	31
5.7	Les capacités exploitées et maximales du centre de tri associées à l'objectif 3.	32
6.1	Analyse des conséquences de l'équation 3.3 sur les quantités envoyées en décharge de déchets (version complète).	41
6.2	Les capacités exploitées et maximales du centre de tri associées à l'objectif 2 où la capacité devient non restrictive (version complète).	42
6.3	Descriptif des quantités de cendres des deux possibilités pour l'objectif 3 (version complète).	43

Chapitre 1

Introduction

La société est aujourd’hui marquée par une importante consommation de biens qui traduit un fort matérialisme au sein des ménages. Les progrès technologiques tendent à accélérer cette tendance, qui menace à terme l’équilibre de notre écosystème en favorisant un modèle très gourmand en ressources. Dans ce contexte, l’environnement au sens large est devenu une composante essentielle pour les décideurs.

Afin de se diriger vers un avenir plus ”vert” et responsable, plusieurs solutions sont envisageables pour atténuer les effets néfastes du comportement humain sur la planète. Le passage des énergies fossiles aux énergies renouvelables, la réduction des déchets et de la consommation de viande, la construction durable, l’agro-écologie ou encore la prise de conscience et de responsabilité de chaque citoyen sont autant de pistes d’amélioration possibles.

Une des conséquences les plus visibles de la surconsommation est l’accumulation de déchets de toutes sortes, si bien que leur gestion peut dans certains cas devenir problématique. Ce travail va tenter d’apporter des modèles de gestion optimaux y répondant pour une situation donnée, étendue sur trente ans. Il prendra pour ce faire aussi bien en compte les dimensions économiques qu’écologiques. Certaines recherches [1] estiment en effet que la production de déchets pourrait continuer de croître au delà de 2100 sans changement brutal. Avec un scénario de croissance axé sur une dimension de durabilité plus prononcée, il serait possible d’atteindre ce pic vers 2075. En connaissant cette croissance future et l’accroissement des déchets dans certaines régions dû à un manque de place dans les décharges, la gestion des déchets restera une application d’intérêt dans les décennies à venir.

Il existe quatre alternatives au traitement des déchets, qui seront présentées de manière plus détaillées au chapitre suivant : la mise en décharge, l’incinération, le recyclage et la réduction des déchets. Cette dernière alternative est bien entendue celle à privilégier mais la plus difficile à appliquer.

Notre objectif est donc d'étudier les politiques d'investissement dans la gestion des déchets en fonction de trois objectifs. Le premier se limite à des considérations purement économiques alors que le second prend en compte l'environnement en exigeant une minimisation de la mise en décharge. Le dernier est quant à lui un compromis entre ces deux dimensions (économique et écologique), plus proche de la réalité.

La première partie du travail décrit le problème dans son intégralité en présentant les informations du système utilisé. La formulation du modèle est ensuite présentée, ainsi que les variables, les objectifs et les contraintes. Enfin, les différentes solutions seront obtenues via le logiciel GAMS, capable de répondre à des problèmes d'optimisation à plusieurs contraintes. Nous pourrons alors interpréter les résultats et présenter une analyse de sensibilité. Nous suggérerons pour terminer quelques améliorations possibles au modèle avant de conclure.

Chapitre 2

Description du problème

Ce chapitre est une présentation de notre problème et de ses limites. Nous y détaillerons dans un premier temps les principales alternatives de traitement des déchets envisagées dans le cadre de ce mémoire. Nous définirons ensuite notre problématique ainsi que nos objectifs en précisant les contours du problème d'optimisation posé. Nous énumérerons enfin les caractéristiques et les données nécessaires pour le résoudre.

2.1 Alternatives pour le traitement des déchets

Tout d'abord, il est utile de se pencher sur les méthodes de traitement des déchets. Comme énoncé précédemment, quatre alternatives sont ici discutées :

- La mise en décharge
- L'incinération
- Le recyclage
- La réduction à la source

La première possibilité est la mise en décharge, encore indispensable dans de nombreux cas. Les conséquences environnementales sont nombreuses avec notamment une nette pollution de l'eau et de l'air, respectivement par infiltration des nappes et par dégagement de gaz. Dans les pays développés, les réglementations se sont renforcées pour interdire les décharges sauvages et privilégier d'autres alternatives. Dans tous les cas, la mise en décharge ne sera jamais une solution car elle bannit la dimension de durabilité. Outre la dimension écologique, les nouvelles restrictions amènent à réaliser des travaux de plus en plus conséquents. En effet, des coûts supplémentaires inattendus sont maintenant nécessaires avec par exemple la protection des nappes d'eau et la capture de déchets organiques.

L'incinération est une autre alternative devenue courante. Suite à la croissance des déchets produits par l'homme, l'incinérateur devient la solution idéale pour les matériaux peu recyclables. Elle permet de réduire fortement le volume et la masse des immondices. Le but est de diminuer au maximum leur quantité via une combustion la plus complète possible. Après initiation de la combustion, la chaleur fournie par les déchets consommés dans le four est suffisante pour initier la combustion des nouveaux déchets, ce qui est avantageux. De nos jours, les nouvelles législations ont provoqué un changement progressif d'équipement dans les incinérateurs qui possèdent à présent une unité de valorisation permettant une reconversion de l'énergie. La chaleur excédentaire du four est alors utilisée pour produire de la vapeur. Cette vapeur va permettre de produire de l'électricité ou du chauffage urbain. Par rapport à la mise en décharge, l'inconvénient principal est bien entendu son coût de construction et d'exploitation nettement supérieur. De plus, un système de lavage de fumée est souvent nécessaire à cause de la production d'air hautement corrosif. Finalement, un petit pourcentage de déchets restera présent sous forme de cendres et formera des résidus. Ceux-ci pourront être valorisés en étant réutilisés dans les travaux publics et le reste s'en ira vers une décharge spécifique.

La troisième alternative est de recycler les déchets. Afin d'obtenir une séparation adéquate des différents composants nécessaire au recyclage, deux possibilités existent : soit les habitants réalisent leur tri à domicile, soit les déchets sont envoyés vers un centre de tri. Le premier cas nécessite un effort de la part des habitants qui doivent séparer les déchets en fonction des catégories. La localité pourra alors récupérer les différents sacs de déchets ou demander aux habitants de les apporter aux poubelles collectives (les conteneurs). Dans notre problème, les deux possibilités de séparation sont prises en considération. Une partie sera triée à domicile par les habitants et le reste pourra être envoyé au centre de tri dans la limite de sa capacité. A l'heure actuelle, quatre types de matériaux sont dominants dans le recyclage : les métaux, les plastiques, les papiers et le verre. Les avantages du recyclage sont notamment la réutilisation des déchets et la réduction de la pollution associée à la dégradation de ces derniers. Dans un second temps, les produits recyclés permettent également de préserver les ressources naturelles fournies par la Terre.

La dernière alternative est la réduction à la source. Cela nécessite une mise en oeuvre spécifique des industries afin de réduire la production, le conditionnement et la distribution de produits finis. Mais il existe à l'heure actuelle peu d'industries intéressées à cause des coûts élevés de mise en place ou encore l'incertitude de l'acceptabilité d'un supplément de prix par les consommateurs. Cette alternative ne sera pas prise en compte dans ce travail. En effet, c'est la solution la plus désirable mais il est difficile d'intégrer ce genre de changement dans un problème d'optimisation.

2.2 Problématique

Pour les raisons évoquées ci-dessus, il est aisé de réaliser qu’aucune de ces alternatives ne peut prendre l’ascendant et couvrir tout le traitement des déchets. La mise en décharge est la moins chère mais n’est pas viable sur le long terme. L’incinération permet de réduire la taille des déchets mais les coûts sont conséquents et la combustion provoque une pollution atmosphérique et des cendres à traiter. Enfin, le recyclage semble être une solution mais nécessite une modification des habitudes de consommation de la part des habitants ainsi qu’une adaptation de la production de la part des entreprises. Sans ce changement, de nombreux centres de tri devraient voir le jour mais cela implique d’importants frais de traitement des déchets...

Notre résolution du problème cherchera donc à déterminer la combinaison "idéale" en fonction des objectifs et des contraintes associées.

Le système pris en considération dans ce modèle se compose tout au plus d’une décharge de déchets, d’un incinérateur avec récupération de chaleur, d’une décharge de cendres, d’un centre de tri et des marchés sur lesquels les composants recyclés sont vendus.

Résoudre ce problème se limite finalement à une optimisation en fonction des alternatives suivantes :

- Les déchets sont envoyés en décharge simple.
- Les déchets sont triés, les composants recyclables sont envoyés vers leur marché respectif et le reste est mis en décharge ou envoyé à l’incinérateur.
- Les déchets non triés sont incinérés et mis en décharge de cendres (avec une séparation préalable des métaux).

2.3 Choix de l’objectif

La raison pour laquelle plusieurs objectifs sont étudiés vient du conflit entre deux visions extrêmes. D’un côté, certains voudraient un coût total de gestion des déchets minimum. De l’autre, c’est la quantité mise en décharge que l’on souhaite minimiser. Ces deux objectifs sont fortement opposés et il est donc intéressant de se pencher sur les deux cas afin de pouvoir les comparer. Bien entendu, il est rare d’être aussi extrême. C’est pourquoi un troisième objectif est également détaillé et tente de trouver un compromis. L’objectif d’un coût global minimum est conservé mais des restrictions sur la quantité de déchets et de cendres mise en décharge sont à respecter.

En résumé, trois objectifs sont donc analysés :

- La minimisation du coût total.

- La minimisation de la quantité mise en décharge.
- La minimisation du coût total avec des contraintes sur les quantités mises en décharge.

En fonction des différentes situations, il se peut qu'une de ces unités ne soit pas nécessaire. Par exemple, si les capacités respectives des unités de traitement sont suffisantes, il est possible que le centre de tri ne soit pas indispensable dans une optique de minimisation du coût. Par contre, minimiser la quantité de déchets en décharge impliquera souvent un centre de tri exploité à plein potentiel. Toutes ces possibilités sont testées grâce au logiciel d'optimisation GAMS Studio et les résultats récoltés sont présentés au chapitre 4.

2.4 Données numériques

Afin de résoudre le problème, il est nécessaire de connaître les données et caractéristiques des déchets et des unités. Leur capacité, leur frais de traitement et leur coût de construction sont énoncés ci-dessous.

2.4.1 Caractéristiques des déchets

Pour simplifier le problème, les flux de déchets proviennent tous d'une composition typique d'un ménage. Cette composition est détaillée au tableau 2.1 [2]. Dans ce même tableau, la teneur en eau, la valeur calorifique à sec et le pourcentage de cendres de chaque élément sont donnés. Ces valeurs seront utiles par la suite afin de calculer le pouvoir calorifique des différents flux de déchets (triés ou non triés). Étant donné que l'incinérateur contient une unité de récupération d'énergie, il est important de calculer ces pouvoirs calorifiques afin d'obtenir l'énergie récupérée qui est à prendre en compte dans le bilan final.

	Poids mouillé (%)	Teneur en eau (%)	Valeur calorifique sèche (kcal/kg)	Cendre (%)
Nourriture	29	72	4 713	4,5
Papier	25	10	4 207	5,4
Verre	13	0	0	100
Plastique	11	2	7 982	10
Poussière	10	3	2 106	70
Textile	8	10	4 250	2,2
Métaux	4	0	412	100
	100	24,70	3 607,56	27,93

Table 2.1: *Caractéristiques des déchets.*

Au niveau des déchets concernant la collectivité étudiée, une quantité de 10 000 tonnes de déchets par an est annoncée. De plus, un taux de croissance est pris en compte à travers une augmentation de 1 % chaque année.

2.4.2 Mise en décharge

La mise en décharge présente des frais de traitement et des coûts fixes faibles mais est limitée en fonction de sa capacité. En ce qui concerne ces frais de traitement, le coût de mise en décharge pour des déchets non traités a été évalué à 52 € par tonne [3]. Pour la décharge de cendres, un rapport publié par l'Omnil Conseil sur les mâchefers [4] (résidus liés à la combustion dans l'incinérateur) donne des frais de 91,35 € par tonne (101,5 CHF). Au niveau des coûts fixes, les journaux Le Dauphiné et La Dépêche annoncent respectivement des frais fixes de 38 millions pour la décharge de déchets et de 10 millions d'euros pour un centre d'enfouissement (décharge de cendres) [5] [6]. Les données des deux types de décharge sont reprises au tableau 2.2 où la capacité totale représente le nombre de tonnes maximum sur la période de 30 ans. Il est bien indiqué que la décharge de déchets est utilisée pour des déchets non traités. Dans ce modèle, les quatre composants recyclables provenant de déchets triés (par le centre de tri ou les habitants) ne finiront jamais en décharge.

Type de décharge	Capacité totale (tonne)	Frais de mise en décharge (€/tonne)	Coût fixe de construction (10^6 €)
déchets non traités	200 000	52	38
cendres	50 000	91,35	10

Table 2.2: Capacités et coûts des décharges.

2.4.3 Incinérateur

Au niveau de l'incinérateur, les coûts fixes sont deux fois plus élevés que la décharge de déchets mais permettent une réduction importance du volume de déchets. D'après une étude réalisée par le bureau Aube Durable [7], le coût s'élèverait à 78 millions d'euros et les coûts variables seraient de 150 € par tonne [8]. Ces deux types de frais, ainsi que la capacité annuelle, sont repris au tableau 2.3 ci-dessous.

Incinérateur	Capacité annuelle (tonne)	Frais de traitement des déchets (€/tonne)	Coût fixe de construction (10^6 €)
déchets entrants	7 500	150	78

Table 2.3: Capacité et coûts de l'incinérateur.

Pour rappel, l'incinérateur contient une unité de valorisation qui lui permet de reven-

dre/économiser de l'énergie à un prix de 0,150 € par kilowatt-heure. De plus, l'efficacité de cette récupération d'énergie est estimée à 75 % [9].

2.4.4 Recyclage

Les différents composants recyclables, triés au préalable, peuvent être revendus sur leur marché respectif (tableau 2.4). Ces valeurs sont tirées d'Eurostat, l'office statistique de l'Union Européenne permettant d'obtenir de nombreuses données statistiques. Il est notamment indiqué que le papier recyclé se vend à 133 € la tonne [10], le plastique recyclé à 335 € la tonne [11], le métal à 255 € la tonne et le verre recyclé à 55 € la tonne [12].

Composant recyclable	prix (€/tonne)
Papier	133
Plastique	335
Métaux	255
Verre	55

Table 2.4: *Prix de vente des différents composants recyclables.*

Comme énoncé précédemment, une partie des habitants acceptent de réaliser ce tri à domicile. Ces derniers possèdent des composants recyclés qui pourront se diriger directement vers les marchés du recyclage. Cette partie de la population représente 36 % de la collectivité. Pour les autres, il sera nécessaire de passer par le centre de tri pour exploiter la branche du recyclage. Les frais de traitement et les frais fixes sont tirés d'un rapport d'Eco-Emballage décrivant la conception, la construction et l'exploitation des centres de tri [13]. Les frais et la capacité annuelle associés à ce centre de tri sont présentés au tableau 2.5 :

Centre de tri	Capacité annuelle (tonne)	Frais de traitement des déchets (€/tonne)	Coût fixe de construction (10^6 €)
déchets entrants	5 000	300	2,72

Table 2.5: *Capacité et coûts du centre de tri.*

Chapitre 3

Formulation du modèle

Après avoir énoncé l'ensemble des données dans le chapitre 2, l'étape suivante est la formulation du problème. Cette formulation commence avec une représentation par un diagramme de réseau qui permet de visualiser l'ensemble des flux de déchets potentiels.

Ce chapitre se poursuit avec la définition des variables de contrôle, l'expression des objectifs ainsi que les contraintes associées au problème. Le but de cette formulation est de rassembler tous les éléments afin de les incorporer par la suite dans le logiciel de résolution GAMS (l'ensemble du code est présent en annexe à la section 6.1).

3.1 Représentation par un diagramme de réseau

Chaque arc présent sur la figure 3.1 correspond à une quantité spécifique de déchets se déplaçant d'un noeud vers un autre noeud. Dans ce diagramme, l'intitulé de chaque noeud est simplifié par deux lettres afin de faciliter la lecture et les équations à venir. Ce diagramme permet de visualiser de manière synthétique l'ensemble des déplacements envisageables (voir section 3.3 pour la définition de chaque variable).

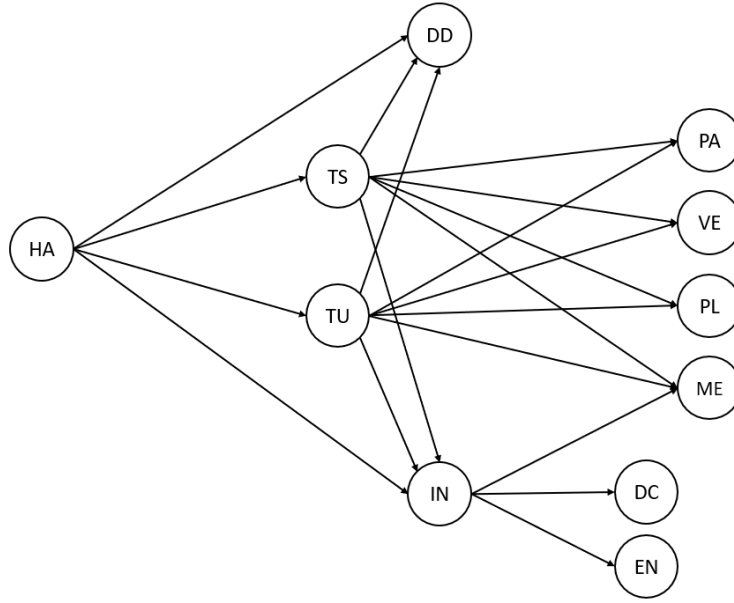


Fig. 3.1: Représentation du modèle par un diagramme de réseau.

Légende: HA: habitants, DD: décharge de déchets, TS: tri à la source, TU: tri à l'usine, IN: incinérateur, PA: marché du papier recyclé, VE: marché du verre recyclé, PL: marché du plastique recyclé, ME: marché des métaux recyclés, DC: décharge de cendres, EN: énergie récupérée.

3.2 Choix des indices

Le temps est le seul indice nécessaire à la résolution de ce problème d'investissement. En effet, le temps sera le seul indice associé aux variables. Il est symbolisé par la lettre t et prend toutes les valeurs comprises entre $t=1$ (qui marque le début du problème) et $t=30$ (indiquant la dernière année).

3.3 Choix des variables de contrôle

Les variables de contrôle, également nommées variables de décision, représentent des quantités utiles à la résolution du problème dont le modèle détermine leur valeur [14].

Pour clarifier le problème, les variables représentant un flux de déchets sont définies en utilisant les lettres des deux noeuds associés à cette variable. De plus, elles sont toutes exprimées en tonnes de déchets à l'exception de la variable IN-EN. Celle-ci décrit une quantité d'énergie récupérée, grâce à l'unité de valorisation de l'incinérateur, exprimée en kilowatt-heure.

Au total, 19 variables de contrôle associées à un flux de déchets ont été recensées. Elles sont exprimées ci-dessous par catégorie en fonction de l'emplacement de départ du flux de déchets.

3.3.1 Variables provenant des habitants

- HA-DD(t) : quantité de déchets allant des habitants vers la décharge au temps t
- HA-TS(t) : quantité de déchets triés à la source par les habitants au temps t
- HA-TU(t) : quantité de déchets allant des habitants vers le centre de tri au temps t
- HA-IN(t) : quantité de déchets allant des habitants vers l'incinérateur au temps t

3.3.2 Variables provenant du tri à la source

- TS-DD(t) : quantité de déchets triés à la source allant vers la décharge de déchets au temps t
- TS-PA(t) : quantité de papiers triés à la source allant vers le marché des papiers recyclés au temps t
- TS-VE(t) : quantité de verres triés à la source allant vers le marché des verres recyclés au temps t
- TS-PL(t) : quantité de plastiques triés à la source allant vers le marché des plastiques recyclés au temps t
- TS-ME(t) : quantité de métaux triés à la source allant vers le marché des métaux recyclés au temps t
- TS-IN(t) : quantité de déchets triés à la source allant vers l'incinérateur au temps t

3.3.3 Variables provenant du tri à l'usine

- TU-DD(t) : quantité de déchets triés à l'usine allant vers la décharge de déchets au temps t
- TU-PA(t) : quantité de papiers triés à l'usine allant vers le marché des papiers recyclés au temps t
- TU-VE(t) : quantité de verres triés à l'usine allant vers le marché des verres recyclés au temps t
- TU-PL(t) : quantité de plastiques triés à l'usine allant vers le marché des plastiques recyclés au temps t
- TU-ME(t) : quantité de métaux triés à l'usine allant vers le marché des métaux recyclés au temps t

- $TU-IN(t)$: quantité de déchets triés à l'usine allant vers l'incinérateur au temps t

3.3.4 Variables provenant de l'incinérateur

- $IN-ME(t)$: quantité de métaux allant de l'incinérateur vers le marché des métaux recyclés au temps t (en amont du processus d'incinération)
- $IN-DC(t)$: quantité de cendres allant de l'incinérateur vers la décharge de cendres au temps t
- $IN-EN(t)$: quantité d'énergie récupérée de l'incinérateur au temps t

3.3.5 Variables indicatrices

La deuxième catégorie de variable est celle des variables indicatrices, qui nous permet de prendre en compte les coûts fixes éventuels liés à l'activité d'une unité selon qu'elle existe ou non. Afin d'obtenir la solution idéale, il n'est pas toujours nécessaire d'utiliser toutes les activités mises à disposition. Il est alors important d'avoir une variable permettant au logiciel d'incorporer les coûts fixes liés à une activité uniquement si cette dernière est utilisée pour la gestion des déchets.

- $y_{DD} = \begin{cases} 1 & \text{si on construit la décharge de déchets,} \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$
- $y_{DC} = \begin{cases} 1 & \text{si on construit la décharge de cendres,} \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$
- $y_{TU} = \begin{cases} 1 & \text{si on construit l'usine pour le tri des déchets,} \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$
- $y_{IN} = \begin{cases} 1 & \text{si on construit l'incinérateur,} \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$

3.4 Expression des objectifs

Dans cette section, les trois objectifs énoncés précédemment sont exprimés en fonction des variables et des données reprises de manière synthétique dans les tableaux 3.1, 3.2 et 3.3.

3.4.1 Minimisation du coût total

Le premier objectif est la minimisation du coût total (coûts variables et coûts fixes) liée à l'ensemble des activités sur la totalité de la période (30 ans) :

$$\begin{aligned}
\min z = & \sum_{t=1}^{30} (HA-DD(t) C_{DD} + HA-TU(t) C_{TU} + HA-IN(t) C_{IN} \\
& + HA-TS(t) C_{TS} + TS-DD(t) C_{DD} + TS-PA(t) C_{PA} \\
& + TS-VE(t) C_{VE} + TS-PL(t) C_{PL} + TS-ME(t) C_{ME} \\
& + TS-IN(t) C_{IN} + TU-DD(t) C_{DD} + TU-PA(t) C_{PA} \\
& + TU-VE(t) C_{VE} + TU-PL(t) C_{PL} + TU-ME(t) C_{ME} \\
& + TU-IN(t) C_{IN} + IN-ME(t) C_{ME} + IN-DC(t) C_{DC} \\
& + IN-EN(t) C_{EN}) \\
& + (K_{DD} * y_{DD} + K_{DC} * y_{DC} + K_{IN} * y_{IN} + K_{TU} * y_{TU})
\end{aligned} \tag{3.1}$$

Dans cette équation, le premier terme est une somme sur 30 ans des flux de déchets multipliés par leur coût respectif. Ce coût peut en réalité devenir un gain lorsque ce paramètre est négatif (voir tableau 3.2 et 3.3). Le second terme s'additionne au premier et se compose des coûts fixes de construction d'une activité, associés à y , la variable indicatrice respective. Il est à noter que C_{TS} , le coût du tri à la source réalisé par les habitants est nul. En effet, les habitants réalisent leur tri à domicile de manière volontaire sans espérance monétaire en retour.

	Constante associée	Coût fixe de construction (10^6 €)
Décharge de déchets	K_{DD}	38
Décharge de cendres	K_{DC}	10
Incinérateur	K_{IN}	78
Tri en usine	K_{TU}	2,72

Table 3.1: Coûts fixes de construction.

Constantes	Coût (€/tonne)
C_{DD}	52
C_{DC}	91,35
C_{TU}	300
C_{TS}	0
C_{IN}	150
C_{PA}	-133
C_{PL}	-335
C_{ME}	-255
C_{VE}	-55

Table 3.2: Coûts variables des activités (une valeur négative représente un gain).

Constante	Coût (€/kwh)
C_{EN}	-0,15

Table 3.3: *Coût induit par l'incinérateur.*

3.4.2 Minimisation de la mise en décharge

Le second objectif est la minimisation des quantités mises en décharge. Il faut minimiser la quantité de déchets allant vers la décharge de déchets ainsi que les cendres se dirigeant vers la décharge de cendres sur l'entièreté de la période.

$$\min w = \sum_{t=1}^{30} \left(\text{HA-DD}(t) + \text{TS-DD}(t) + \text{TU-DD}(t) + \text{IN-DC}(t) \right) \quad (3.2)$$

3.4.3 Minimisation du coût total avec contrainte sur la mise en décharge

Le dernier objectif est équivalent à l'équation 3.1 du premier objectif mais contient deux contraintes supplémentaires afin de limiter la mise en décharge.

- Ne pas excéder 20% de déchets non incinérés en décharge de déchets pour chaque année :

$$\text{HA-DD}(t) + \text{TS-DD}(t) + \text{TU-DD}(t) \leq 0.2 * 10000(1 + a)^{t-1}, \quad \forall t \quad (3.3)$$

- Ne pas excéder 10% des déchets totaux en décharge de cendres pour chaque année :

$$\text{IN-DC}(t) \leq 0.1 * 10000(1 + a)^{t-1}, \quad \forall t \quad (3.4)$$

Le facteur a présent dans ces deux contraintes permet la prise en compte du taux de croissance annuel des déchets ($a = 0.01$).

3.5 Expression des contraintes

Le dernier point de la formulation est l'expression des contraintes. Pour obtenir des résultats cohérents, il est obligatoire de réfléchir à toutes les contraintes qui apparaissent dans le problème. La condition de positivité, le respect de la composition des déchets et les capacités de chaque unité font notamment partie des contraintes de ce problème. Cette section va énumérer l'ensemble des contraintes qui devront être respectées pour chacun des objectifs présentés à la section précédente.

- Il faut une contrainte de positivité sur chaque flux de déchets :

$$\begin{aligned}
& \text{HA-DD}(t) \geq 0, \quad \text{HA-TS}(t) \geq 0, \quad \text{HA-TU}(t) \geq 0, \quad \text{HA-IN}(t) \geq 0, \\
& \text{TS-DD}(t) \geq 0, \quad \text{TS-PA}(t) \geq 0, \quad \text{TS-VE}(t) \geq 0, \quad \text{TS-PL}(t) \geq 0, \\
& \text{TS-ME}(t) \geq 0, \quad \text{TS-IN}(t) \geq 0, \quad \text{TU-DD}(t) \geq 0, \quad \text{TU-PA}(t) \geq 0, \\
& \text{TU-VE}(t) \geq 0, \quad \text{TU-PL}(t) \geq 0, \quad \text{TU-ME}(t) \geq 0, \quad \text{TU-IN}(t) \geq 0, \\
& \text{IN-ME}(t) \geq 0, \quad \text{IN-DC}(t) \geq 0, \quad \text{IN-EN}(t) \geq 0, \quad \forall t
\end{aligned} \tag{3.5}$$

- Il y a le caractère binaire des indicatrices :

$$y_i \in \{0, 1\}, \quad \forall i = \text{DD}, \text{DC}, \text{IN}, \text{TU} \tag{3.6}$$

- Il faut respecter la quantité de déchets annuelle qui varie en fonction de taux de croissance a fixé à 1 % :

$$\text{HA-DD}(t) + \text{HA-TS}(t) + \text{HA-TU}(t) + \text{HA-IN}(t) = 10000(1 + a)^{t-1} \tag{3.7}$$

Pour les prochaines contraintes, il est nécessaire de rappeler une hypothèse. Elle indique que tous les déchets triés (à l'usine ou à la source) sont rentabilisés à leur maximum. Par conséquent, tous les papiers, les verres, les plastiques et les métaux triés sont dirigés vers leur marché respectif.

Les contraintes 3.8 jusqu'à 3.12 se basent sur la composition des déchets. En effet, nous imposons un panier de déchets ménagers détaillé dans le tableau 2.1.

- Deux contraintes expriment le lien entre les déchets triés et le marché du papier recyclé. Elles indiquent respectivement que 25 % des déchets triés à la source ou triés à l'usine vont sur le marché du papier recyclé :

$$\text{TS-PA}(t) = 0,25 * \text{HA-TS}(t) \quad \text{et} \quad \text{TU-PA}(t) = 0,25 * \text{HA-TU}(t), \quad \forall t \tag{3.8}$$

- Deux contraintes expriment le lien entre les déchets triés et le marché du verre recyclé. Elles indiquent respectivement que 13 % des déchets triés à la source ou triés à l'usine vont sur le marché du verre recyclé :

$$\text{TS-VE}(t) = 0,13 * \text{HA-TS}(t) \quad \text{et} \quad \text{TU-VE}(t) = 0,13 * \text{HA-TU}(t), \quad \forall t \tag{3.9}$$

- Deux contraintes expriment le lien entre les déchets triés et le marché du plastique recyclé. Elles indiquent respectivement que 11 % des déchets triés à la source ou

triés à l'usine vont sur le marché du plastique recyclé :

$$TS-PL(t)=0,11 * HA-TS(t) \quad \text{et} \quad TU-PL(t)=0,11 * HA-TU(t), \quad \forall t \quad (3.10)$$

- Deux contraintes expriment le lien entre les déchets triés et le marché des métaux recyclés. Elles indiquent respectivement que 4 % des déchets triés à la source ou triés à l'usine vont sur le marché des métaux recyclés :

$$TS-ME(t)= 0,04 * HA-TS(t) \quad \text{et} \quad TU-ME(t)=0,04 * HA-TU(t), \quad \forall t \quad (3.11)$$

- Le métal présent dans les déchets envoyés vers l'incinérateur, provenant des habitants, doit se diriger vers le marché des métaux recyclés :

$$IN-ME(t)=0,04 * HA-IN(t), \quad \forall t \quad (3.12)$$

- Il est nécessaire que 36 % des déchets de chaque temps t correspondent à des déchets triés à la source :

$$HA-TS(t)=0,36 * 10000(1 + a)^{t-1}, \quad \forall t \quad (3.13)$$

- La variable indicatrice y_{DC} est dépendante de la variable indicatrice y_{IN} . En effet, la décharge de cendres n'existe que si l'incinérateur fonctionne :

$$y_{DC} = y_{IN} \quad (3.14)$$

- Il est nécessaire de réaliser un bilan global sur TS et TU, le tri à la source et le tri en usine. Pour ce faire, on égalise les flux de déchets entrants aux flux de déchets sortant :

$$\begin{aligned} HA-TS(t) = TS-DD(t) + TS-IN(t) + TS-PA(t) \\ + TS-VE(t) + TS-PL(t) + TS-ME(t), \quad \forall t \end{aligned} \quad (3.15)$$

$$\begin{aligned} HA-TU(t) = TU-DD(t) + TU-IN(t) + TU-PA(t) \\ + TU-VE(t) + TU-PL(t) + TU-ME(t), \quad \forall t \end{aligned} \quad (3.16)$$

- La quantité de cendres envoyée à la décharge de cendres doit être égale à la somme des composantes du flux de déchets arrivant à l'incinérateur, pondérés par leur fraction de cendres respective. Il y a en effet une fraction de cendres différente entre

les déchets non triés provenant directement des habitants (CE_{HA}) et les déchets triés (CE_{TRI}). Les tableaux ci-dessous résument les deux compositions de déchets entrants et leur pourcentage de cendres respectif. Dans le tableau de gauche de la table 3.4, il est intéressant de s'arrêter sur la dernière case. En effet, le pourcentage de cendres passe de 27.93 % (voir tableau 2.1) à 23.93 % dans celui-ci. La raison de ce changement est que les métaux ne forment pas de cendres étant donné qu'ils sont séparés avant de rentrer dans l'incinérateur. Pour le tableau de droite, les quatre éléments recyclables sont séparés et la composition des déchets est majoritairement de la nourriture accompagnée de poussières et de textiles.

	Poids mouillé (%)	Cendre (%)
Nourriture	29	4.5
Papier	25	5.4
Verre	13	100
Plastiques	11	10
Poussière	10	70
Textiles	8	2.2
Métaux	4	0
Total	100	23.93

	Poids mouillé (%)	Cendre (%)
Nourriture	61.70	4.5
Poussière	21.28	70
Textiles	17.02	2.2
Total	100	18.04

Table 3.4: Les deux compositions de déchets pour respectivement le flux HA-IN et les flux TS-IN et TU-IN.

Les pourcentages de cendres des deux flux de déchets sont calculés ci-dessous :

$$CE_{HA} = 0.29 * 0.045 + 0.25 * 0.054 + 0.13 * 1 + 0.11 * 0.1 + 0.1 * 0.7 + 0.08 * 0.022 + 0.04 * 0 = 0.2393$$

$$CE_{TRI} = 0.6170 * 0.045 + 0.2128 * 0.7 + 0.1702 * 0.022 = 0.1804$$

Ceci permet d'établir la contrainte entre le flux de cendres sortant de l'incinérateur (IN-DC) et les différents flux entrants à l'incinérateur :

$$IN-DC(t) = CE_{HA} * HA-IN(t) + CE_{TRI} * (TU-IN(t) + TS-IN(t)) \quad (3.17)$$

- Il faut également exprimer la contrainte par rapport à l'énergie récupérée. Pour ce faire, on réalise le bilan énergétique de l'incinérateur. Il est important de différencier les deux types de déchets entrants : soit l'énergie provient des déchets non triés des habitants (EN_{HA}) soit elle provient de déchets au préalable triés (EN_{TRI}).

Dans le premier cas, le calcul se base sur les données reprises au tableau 2.1. Il est utile de prendre en compte la teneur en eau afin de pouvoir utiliser la valeur calorifique sèche.

$$\begin{aligned} EN_{HA} &= (0.29 * 0.28) * 4713 + (0.25 * 0.9) * 4207 + (0.11 * 0.98) * 7892 \\ &\quad + (0.1 * 0.97) * 2106 + (0.08 * 0.9) * 4250 + (0.04 * 1) * 0 = 2700.01 \text{ kcal/kg} \\ &= 3138,01 \text{ kwh/tonne} \end{aligned}$$

Pour transformer un *kcal* en *kwh*, il faut utiliser deux conversions. Premièrement, 1 *kcal* équivaut à 4,184 *kJ*. Deuxièmement, 1 *kwh* vaut l'énergie d'un appareil de 1000 watts pendant une durée d'une heure, soit $3,6 * 10^6$ joules. La combinaison de ces deux conversions énonce que 1 *kcal* vaut 0.0011622 *kwh*. A noter que la contribution des métaux est encore nulle car ils sont séparés des déchets avant le passage à l'incinérateur.

Le second cas ne prend pas en considération le papier, le verre, le plastique et les métaux qui sont envoyés vers leur marché respectif.

$$\begin{aligned} EN_{TRI} &= (0.29 * 0.28) * 4713 + (0.1 * 0.97) * 2106 + (0.08 * 0.9) * 4250 \\ &= 892.98 \text{ kcal/0.47kg} = 1899.95 \text{ kcal/kg} = 2208.16 \text{ kwh/tonne} \end{aligned}$$

En prenant en compte le rendement énergétique de l'incinérateur qui est de 75 %, la contrainte concernant la récupération d'énergie devient la suivante :

$$IN-EN(t) = 0.75 * (EN_{HA} * HA-IN(t) + EN_{TRI} * (TS-IN(t) + TU-IN(t))) \quad (3.18)$$

Finalement, il reste quatre contraintes qui sont associées aux capacités maximales des différentes activités.

- La capacité annuelle du centre de tri en usine est de 5 000 tonnes de déchets :

$$HA-TU(t) \leq 5000 * y_{TU}, \quad \forall t \quad (3.19)$$

- La capacité maximale de la décharge de déchets sur la période de 30 ans est de 200 000 tonnes de déchets :

$$\sum_{t=1}^{30} (HA-DD(t) + TS-DD(t) + TU-DD(t)) \leq 200000 * y_{DD} \quad (3.20)$$

- La capacité maximale de la décharge de cendres sur la période de 30 ans est de 50 000 tonnes de cendres :

$$\sum_{t=1}^{30} \text{IN-DC}(t) \leq 50000 * y_{DC} \quad (3.21)$$

- La capacité annuelle de l'incinérateur est de 7 500 tonnes de déchets :

$$\text{HA-IN}(t) + \text{TU-IN}(t) + \text{TS-IN}(t) \leq 7500 * y_{IN}, \quad \forall t \quad (3.22)$$

Chapitre 4

Résultats et interprétations

Grâce à la formulation du problème présentée au chapitre précédent, il est maintenant possible d'obtenir les résultats associés à chaque fonction objectif.

Dans un premier temps, les résultats seront présentés en s'intéressant à la dimension économique et écologique. Pour ce faire, les coûts totaux et les quantités mises en décharge seront comparés. La section suivante sera axée sur la durabilité du modèle actuel, en se concentrant sur les conséquences d'une période supérieure à 30 ans.

4.1 Analyse comparative de l'aspect économique

Le logiciel d'optimisation GAMS permet de trouver rapidement les trois coûts totaux associés aux trois fonctions objectifs : minimiser le coût total (objectif 1), minimiser la mise en décharge (objectif 2) et minimiser le coût total avec des restrictions sur les décharges (objectif 3) :

	Objectif 1	Objectif 2	Objectif 3
Coût total (10^6 €)	78,84	125,72	116,74

Table 4.1: *Les coûts totaux en fonction de l'objectif.*

Comme supposé, l'objectif 1 présente un coût nettement inférieur. Il est nécessaire d'augmenter l'investissement de 46,88 millions d'euros pour atteindre l'objectif 2 (soit une augmentation de 59,46 %). Les restrictions sur les décharges provoquent quant à elles un financement supplémentaire de 37,9 millions d'euros (soit 48,07 % de l'investissement initial).

Les écarts d'investissement sont donc conséquents mais peuvent s'expliquer de manière qualitative grâce aux valeurs des variables indicatrices reprises au tableau 4.2.

Variables binaires	Objectif 1	Objectif 2	Objectif 3
y_{DD}	1	1	1
y_{DC}	1	1	1
y_{TU}	0	1	1
y_{IN}	1	1	1

Table 4.2: Les variables indicatrices en fonction de l'objectif.

L'objectif 1 est le seul à ne pas créer le centre de tri ($y_{TU} = 0$). Cette activité contient un coût de construction assez bas mais les coûts de traitement sont très importants par rapport aux autres activités (voir tableau 3.1 et 3.2). En effet, la constante de coût pour le tri en usine, C_{TU} , vaut le double de C_{IN} et presque le sextuple de C_{DD} (respectivement le coût de traitement pour l'incinérateur et la décharge de déchets). Malgré l'argent récupéré grâce aux composants recyclés, la création du centre de tri n'est donc pas à conseiller si l'objectif est la minimisation du coût total.

Afin de démontrer ces propos avec une approche plus quantitative, une comparaison des coûts a été réalisée pour l'objectif 1 en mettant en confrontation un second scénario. Le premier scénario reprend l'objectif 1 où les déchets non triés ont la possibilité de se diriger vers l'incinérateur. À côté de celui-ci, un nouveau scénario est créé grâce à l'ajout d'une contrainte supplémentaire imposant aux déchets non triés de se diriger vers le centre de tri. En résumé, le premier scénario peut présenter des flux de déchets non triés se dirigeant vers l'incinérateur et la décharge de déchets. Dans ce cas, le centre de tri est inexistant et l'incinérateur atteint sa capacité maximale annuelle à partir de l'année 17. Le second scénario fonctionne avec un centre de tri exploitant toute sa capacité de traitement. Ceci se résume à transformer l'inégalité de l'équation 3.19 en une égalité. Autrement dit, la valeur annuelle de HA-TU est imposée à 5 000 tonnes de déchets, la capacité maximale du centre de tri. Les chiffres obtenus dans le tableau 4.3 confirment le surcoût associé à un centre de tri par rapport à un incinérateur.

Objectif 1	Scénario 1	Scénario 2	Écart d'investissement
y_{TU}	0	1	-
Coût total (10^6 €)	78,84	125,47	46,63

Table 4.3: Comparaison du coût associé à l'objectif 1 avec $y_{TU} = 0$ ou avec un centre de tri (forcé) fonctionnant à son maximum.

Il est également intéressant de se pencher sur l'écart d'investissement entre l'objectif 2 et l'objectif 3. Les coûts fixes, provoqués par une variable indicatrice non nulle, sont égaux mais l'objectif 3 induit tout de même une réduction de 8,98 millions d'euros. Dans cet objectif, le centre de tri est créé afin de respecter les nouvelles contraintes sur les décharges. Malgré cela, l'usine de triage ne sera jamais une priorité (ce qui est dû aux

coûts de traitement élevés) mais plutôt une solution de secours afin de rester conforme aux contraintes 3.3 et 3.4.

4.2 Analyse comparative de l’aspect écologique

Afin d’analyser le second aspect, l’intérêt se porte sur la quantité de déchets mise en décharge (les déchets mais également les cendres). Pour ce faire, une équation est ajoutée pour l’objectif 1 et l’objectif 3 dans le code GAMS sous la dénomination ”TOT-DECHARGE” (voir annexe 6.1). Cette équation permet de calculer le nombre total de tonnes se dirigeant vers les décharges sur la période de 30 ans :

$$w = \sum_{t=1}^{30} (\text{HA-DD}(t) + \text{TS-DD}(t) + \text{TU-DD}(t) + \text{IN-DC}(t))$$

Les nombres de tonnes de déchets mises en décharge sont repris au tableau ci-dessous.

	Objectif 1	Objectif 2	Objectif 3
Quantité mise en décharge (tonnes)	122 536,59	42 489,32	104 354,67

Table 4.4: *Les quantités de déchets mises en décharge en fonction de l’objectif.*

Le tableau 4.4 indique des variations supérieures à celles rencontrées dans la comparaison des coûts. Les quantités de l’objectif 2, minimisant les quantités en décharge, ne représentent que 34,67 % de celles présentes à l’objectif 1 (et 40,72 % de celles obtenues à l’objectif 3). Il est intéressant de remarquer que les deux équations énonçant des restrictions sur les mises en décharge (équations 3.3 et 3.4) ne diminuent pas de manière significative les déchets envoyés en décharge.

Afin de vérifier si les deux contraintes additionnelles sont réellement restrictives, il est utile de comparer les résultats obtenus de l’objectif 1 et l’objectif 3. En ce qui concerne l’équation 3.3, exprimant un maximum annuel vers la mise en décharge de déchets, le tableau comparatif 4.5 a été dressé afin d’analyser les conséquences de cette restriction.

Année	Déchets vers DD en tonnes (objectif 1)	Déchets vers DD en tonnes (objectif 3)	Restriction sur DD en tonnes
1	1 692	2 000	2 000
5	1 760,70	2 081,21	2 081,21
10	8 358,10	2 187,37	2 187,37
15	1 944,91	2 298,95	2 298,95
20	2 276,02	2 416,22	2 416,22
25	2 774,69	2 539,47	2 539,47
30	3 298,81	2 669,01	2 669,01
Total	72 536,59	69 569,78	69 569,78

Table 4.5: *Analyse des conséquences de l'équation 3.3 sur les quantités envoyées en décharge de déchets.*

Dans le cadre de l'objectif 3, les déchets envoyés en décharge atteignent la quantité maximale autorisée pour chaque année. Avec l'apparition de cette contrainte, les données annuelles des deux objectifs augmentent différemment et se chevauchent entre les années 20 et 25 (voir Annexe 6.2 pour l'entièreté des données). En effet, l'objectif 1 contient des quantités de déchets envoyées en décharge inférieures à la restriction jusqu'à l'année 21 à l'exception de l'année 10 qui vaut quasiment le quadruple par rapport à la restriction. Ces chiffres permettent deux remarques. La première indique qu'une contrainte additionnelle peut modifier complètement la répartition des flux de déchets malgré un résultat final assez proche. La seconde est que cette contrainte implique une diminution assez faible, de l'ordre de 3 tonnes de déchets mises en décharge (alors que le tableau 4.4 indique une diminution globale de l'ordre de 18 tonnes). Cette seconde remarque laisse supposer que la deuxième contrainte va apporter des changements plus significatifs.

Cette dernière, exprimée à l'équation 3.4, permet donc de limiter la mise en décharge de cendres. Afin d'évaluer le changement à la suite de cette restriction, le tableau 4.6 est présenté. Il met en évidence le nombre de tonnes de cendres allant vers la décharge de cendres avant et après la restriction.

Année	Déchets vers DC en tonnes (objectif 1)	Déchets vers DC en tonnes (objectif 3)	Restriction sur DC en tonnes
1	1 531,52	1 000	1 000
5	1 593,71	1 040,60	1 040,60
10	117,74	1 093,69	1 093,69
15	1 760,44	1 149,47	1 149,47
20	1 794,75	1 208,11	1 208,11
25	1 794,75	1 269,73	1 269,73
30	1 794,75	1 334,50	1 334,50
Total	50 000	34 784,89	34 784,89

Table 4.6: *Analyse des conséquences de l'équation 3.4 sur les quantités envoyées en décharge de cendres.*

A l'exception de l'année 10, les quantités de cendres envoyées vers la décharge de cendres pour l'objectif 1 sont toutes supérieures à la nouvelle restriction. De plus, le changement est plus brutal avec une quantité de déchets mise en décharge passant de 50 000 tonnes à moins de 35 000 tonnes. Les tableaux 4.5 et 4.6 indiquent également que les contraintes additionnelles sont restrictives tout au long de la période de 30 ans. En effet, les termes de gauche des équations 3.3 et 3.4 sont dans les deux cas égaux à la restriction imposée par les termes de droite. Finalement, il est à noter qu'il existe un phénomène d'amplification sur le coût total. Ceci signifie que le supplément d'investissement pour passer de l'objectif 1 à l'objectif 3 augmente de manière plus forte que la simple addition des deux contraintes. En effet, lorsqu'il est nécessaire de diminuer la mise en décharge de déchets, il devient financièrement préférable de les incinérer. Or, cette incinération est limitée par la seconde restriction, provoquant un rapatriement obligatoire vers le centre de tri et donc des coûts supplémentaires (et inversement).

4.3 Perspective à long terme

Ce mémoire a pour objectif d'étudier la politique d'investissement de gestion des déchets sur une période de 30 ans, mais il nous a semblé intéressant de nous projeter un peu plus loin. En effet, il n'est pas imaginable d'accroître indéfiniment le nombre de décharges.

Grâce aux dernières lignes des tableaux 4.5 et 4.6 indiquant le nombre de tonnes envoyées en décharge, quelques commentaires peuvent être réalisés. Ceux-ci sont portés sur l'objectif 1, qui provoque la plus grande quantité de déchets/cendres en décharge. Tout d'abord, une analyse du caractère restrictif ou non des décharges est réalisée. Pour la décharge de déchets, la capacité exploitée après 30 années est de 72 536,59 tonnes pour une capacité maximale de 200 000. Par contre, la décharge de cendres est quant

à elle utilisée à son plein potentiel qui est de 50 000 tonnes de cendres. Si la période d'étude est prolongée, la quantité de déchets incinérés resterait la même à cause de cette restriction de capacité. En augmentant progressivement la période d'étude, il est observé une montée progressive de la capacité exploitée de la décharge de déchets jusque l'année 42 (tableau 4.7). Il est important de préciser que les solutions optimales ci-dessous sont encore trouvées avec une variable indicatrice y_{TU} nulle.

Longueur de la période (année)	Capacité exploitée en DD (tonne)	Capacité totale exploitée DD+DC (tonne)	Investissement (10^6 €)
30	72 536,59	122 536,59	78,86
35	128 172,20	178 172,20	79,56
40	186 645,78	236 645,78	80,33
41	198 693,67	248 693,67	80,49
42	200 000	250 000	82,83

Table 4.7: *Évolution des capacités exploitées (en tonnes) et du surcoût pour une période supérieure à 30 années.*

A cours de l'année 42, toutes les unités deviennent saturées. Les capacités maximales des deux décharges sont atteintes. Il n'est donc plus possible de déposer en décharge de déchets ni de les incinérer. La dernière solution serait de construire et d'exploiter le centre de tri mais ce dernier ne peut répondre à la quantité de déchets à cause de sa capacité annuelle de 5 000 tonnes. Ce raisonnement permet de mettre en évidence que des coûts supplémentaires seront obligatoirement nécessaires après ces 42 années. Les solutions sont nombreuses : extension du centre de tri ou création d'une seconde usine, extension des capacités en décharge ou création d'autres décharges.

Au niveau de l'investissement, le supplément de coût est très faible à travers les années. Toutes les unités sont déjà construites et le surcoût vient des frais de traitement supplémentaires à réaliser chaque année.

En résumé, analyser le modèle sur le long terme permet de se rendre compte de la situation future. Dans le cas de l'objectif 1, le modèle actuel ne pourra fonctionner éternellement. Certains changements devront être apportés. Avoir une longueur d'avance permettra d'étaler les investissements nécessaires à des extensions ou créations d'unités de traitement. Cette perspective du long terme défavorise fortement l'objectif 1 à la faveur des deux autres. L'objectif 2, qui minimise la quantité en décharge, est la meilleure alternative en terme de durabilité et pourrait encore être amélioré avec une capacité plus large du centre de tri (voir section 5.3). Enfin, l'objectif 3 est un compromis qui est plus durable que l'objectif 1 et qui est moins cher que l'objectif 2. Il contient l'avantage de pouvoir améliorer aisément la durabilité du modèle en devenant plus restrictif sur les deux contraintes additionnelles.

Chapitre 5

Analyse de sensibilité

Afin d'analyser de manière plus détaillée les trois alternatives provenant des trois fonctions objectifs, plusieurs questions subsidiaires sont posées. Ces différentes questions, formulées par les membres du conseil d'administration de la collectivité locale, permettront d'avoir plus de connaissances en vue de réaliser un choix final. Cette section discute des taxes d'immondice, de la restriction sur la décharge de cendres et d'une éventuelle modification de la capacité du centre de tri.

5.1 Taxes d'immondice

La taxe d'immondice est une taxe que chaque ménage doit payer pour contribuer au financement de la collecte et du traitement des déchets. Dans cette analyse, la taxe d'immondice est calculée afin de couvrir l'ensemble des frais et elle est exprimée en € par kg. Le tableau ci-dessous compare cette taxe pour chaque objectif.

	Objectif 1	Objectif 2	Objectif 3
Coût total (10^6 €)	78,84	125,72	116,74
Quantité totale de déchets (10^8 kg)	3,48	3,48	3,48E
Taxe d'immondice (€ par kg)	0.2266	0.4361	0.3356

Table 5.1: *La taxe d'immondice pour chaque objectif.*

Il est observé que la décision pourrait avoir un impact important sur la collectivité locale. En effet, cette taxe couvrant ici l'ensemble des frais de traitement (comprenant les frais variables et les frais fixes), est presque multipliée par deux entre l'objectif 1 et l'objectif 2.

C'est une décision cruciale car la plupart des riverains comprendront difficilement une taxe d'immondice multipliée par deux. La taxe associée à l'objectif 2 impliquerait de nombreux questionnements et des mécontentements de la part des habitants. Mais cette augmentation peut également être analysée d'un autre point de vue. Une augmentation

de la taxe permet d'avancer vers une gestion des déchets plus responsable et plus durable en minimisant la mise en décharge. De plus, la hausse de la taxe pourrait provoquer une prise de conscience des habitants qui pourraient réaliser des efforts afin de diminuer leur quantité de déchets et donc leur taxe annuelle pour les prochaines années. Ceci ne sera possible qu'avec un effort général de la population car le montant de la taxe d'immondice est une moyenne des ménages.

5.2 Modification de la restriction sur la décharge de cendres

La seconde question des membres du conseil concerne la restriction sur la décharge de cendres imposée comme contrainte pour l'objectif 3. L'alternative proposée est de modifier la masse de cendres autorisée à la mise en décharge de 10 % à 15 % moyennant une augmentation du coût de traitement des cendres de 25 %. Le but est de vérifier si la ville va diminuer ses coûts totaux au détriment d'une augmentation de 5 % de la masse de cendres en décharge.

Ce changement entraîne la modification de la constante C_{DC} , le coût de la mise en décharge de cendres, qui passe de 91,35 à 114,1875 €/tonne. La seconde modification est la contrainte décrite à l'équation 3.4 où la masse de cendres autorisée à la mise en décharge passe de 10 % à 15 % :

$$\text{IN-DC} (t) \leq 0.15 * 10000(1 + a)^{t-1}, \quad \forall t \quad (5.1)$$

Cette alternative modifie de manière significative le coût total, se rapprochant fortement du coût de l'objectif 1 (aucune restriction sur les décharges). Le coût passe de 116,74 à 83,71 millions d'euros.

En effet, en augmentant la possibilité de mettre les cendres en décharge de 5 %, la contrainte n'a plus d'effet. Étant donné que l'incinérateur est limité à une quantité annuelle de 7 500 tonnes de déchets par année, la quantité maximale de cendres allant de l'incinérateur à la mise en décharge (IN-DC) est de 1 794,75 tonnes (correspondant à $CE_{HA} * \text{IN-DC}$). Le tableau ci-dessous exprime l'inefficacité de cette contrainte :

Année	IN-DC (actuelle)	Restriction sur DC (actuelle)	IN-DC (alternative)	Restriction sur DC (alternative)
1	1 000	1 000	1 457.82	1 500
5	1 040.60	1 040.60	1 517.01	1 560.91
10	1 093.69	1 093.69	1 594.39	1 640.53
15	1 149.47	1 149.47	1 675.72	1 724.21
20	1 208.11	1 208.11	1 761.2	1 812.16
25	1 269.73	1 269.73	1 794.75	1 904.6
30	1 334.5	1 334.5	1 786.06	2 001.76

Table 5.2: *Descriptif des quantités de tonnes de cendres des deux possibilités pour l'objectif 3.*

La restriction "actuelle" limite la quantité de cendres. Par contre, l'alternative ne devient à aucun moment une barrière à la production de cendres. Il est observé que la quantité de cendres (IN-DC) reste inférieure à la restriction durant l'entière de la période. Le tableau 5.2 exprime ces données tous les 5 ans pour simplifier la lecture mais la conclusion reste la même pour les autres années (voir Annexe 6.4).

En résumé, cette modification n'a pas énormément d'intérêt. Le but de l'objectif 3 est de trouver un compromis entre la minimisation du coût et de la quantité de déchets en décharge. Avec cette modification, l'objectif 3 n'est plus une solution intermédiaire mais une solution très rapprochée de l'objectif 1. En effet, les données présentées au tableau 5.3 se rapprochent fortement de l'objectif de minimisation du coût sans restrictions sur les décharges.

	Objectif 3 (actuel)	Objectif 3 (alternative)	Objectif 1
Coût total (10^6 €)	116,74	83,71	78,86
Capacité exploitée en DC (tonnes)	34 784,89	50 000	50 000
Capacité exploitée en DC et DD (tonnes)	104 354,67	119 569,78	122 536,59

Table 5.3: *Comparaison des objectifs 1 et 3 suite à la modification de la restriction sur la décharge de cendres.*

Une possibilité plus intéressante serait d'évaluer une augmentation plus faible de la masse de cendres en décharge. Si l'alternative passe d'une augmentation de la masse de cendres autorisée de 10 % à 12,5 %, la situation change fortement. Cette nouvelle possibilité entraînerait une alternative supplémentaire se trouvant plus ou moins à mi-chemin entre l'objectif 1 et l'objectif 3 (43 481 tonnes de cendres en décharge et un investissement de 97,19 millions d'euros).

5.3 Modification de la capacité du centre de tri

Enfin, les membres du conseil d'administration aimeraient connaître l'influence d'une modification de la capacité du centre de tri. Pour l'instant, l'usine qui permet de trier les déchets possède une capacité maximale de 5 000 tonnes de déchets par an.

Pour analyser si un agrandissement de cette capacité aura un effet sur le coût total de traitement des déchets, il est nécessaire de distinguer successivement les trois objectifs.

5.3.1 Objectif 1 : minimisation du coût total

Dans ce premier cas, cette alternative est inefficace étant donné que le centre de tri n'est pas construit (variable indicatrice $y_{TV} = 0$). En effet, la solution optimale est trouvée sans l'usine à tri. Cette activité de triage est plus coûteuse que la mise en décharge ou l'incinération à cause des coûts de traitements élevés. Comme énoncé à la section 4.3, les caractéristiques actuelles du centre de tri ne permettent pas son utilisation lorsque l'intérêt est la minimisation du coût.

5.3.2 Objectif 2 : minimisation de la mise en décharge

Dans ce second cas, cette alternative peut avoir un effet conséquent sur le résultat final. Pour rappel, cet objectif s'accompagne d'une création de toutes les activités de gestion des déchets (tableau 4.2). Le centre de tri est bien existant et il est utilisé à son maximum sur toute la période (tableau 5.4).

Année	Capacité exploitée (tonne)	Capacité maximale (tonne)	Prix caché
1	5 000	5 000	-0.1545
10	5 000	5 000	-0.1545
20	5 000	5 000	-0.1545
24	5 000	5 000	-0.5577
30	5 000	5 000	-0.5577
Total	150 000	150 000	-7.4574

Table 5.4: Les capacités exploitées et maximales du centre de tri associées à l'objectif 2 ainsi que le prix caché de l'équation 3.19.

Il est possible d'analyser rapidement les conséquences d'une modification du centre de tri. En effet, la notion de prix caché permet d'interpréter le changement d'une contrainte sur l'objectif. Par définition, le prix caché est associé à une contrainte et représente l'augmentation de la fonction objectif pour une augmentation unitaire du membre de droite de la contrainte 3.19 [14]. Dans la solution fournie par le logiciel GAMS, le prix

caché est présent pour chaque contrainte dans la colonne nommée "MARGINAL" et ce dernier est présenté pour quelques années dans le tableau 5.4. La dernière colonne du tableau se lit par exemple de la façon suivante : une augmentation unitaire de la capacité du centre de tri (5 001 tonnes) provoque pour les années 1 et 30 des augmentations de la quantité de déchets mise en décharge de -0.1545 et -0.5577 respectivement. Étant donné que le prix caché est ici négatif, il s'interprète comme une diminution de l'objectif. En sommant le prix caché des 30 années, l'augmentation unitaire du centre de tri provoque une diminution de 7 457 kilogrammes de déchets en décharge (associé à coût supplémentaire de 10 060 €).

Il est possible de pousser l'analyse en profondeur en supposant une capacité du centre de tri bien plus grande. Comme énoncé ci-dessus, il est observé une diminution de la quantité mise en décharge mais une nette augmentation du coût total. Le tableau ci-dessous reprend la situation initiale et une autre situation où la capacité du centre de tri serait "illimitée", dans le sens où la contrainte de capacité 3.19 n'est plus restrictive :

	capacité limitée	capacité illimitée
Nombre de tonnes en décharge	42 489.32	29 493.41
Coût total (10 ⁶ €)	125,72	151,69

Table 5.5: *Comparaison du coût et des quantités mises en décharge associés à l'objectif 2 avec une capacité illimitée du centre de tri.*

La modification de la capacité du centre de tri ne provoque pas d'effet bénéfique sur le coût total mais bien sur la fonction objectif (minimisation de la mise en décharge). Il est intéressant d'analyser plus en détail cette alternative. Son avantage est de diminuer fortement la mise en décharge. En effet, avec un centre de tri possédant une capacité "illimitée", le nombre de tonnes en décharge diminue de 30,59 % avec une quantité inférieure à 30 000 tonnes de déchets en décharge sur la période de 30 ans. L'inconvénient est présenté dans la dernière ligne du tableau 5.5. Le coût total augmente de 20,66 %, un coût supplémentaire conséquent qui est à prendre en considération malgré la minimisation de l'objectif.

Ces chiffres proviennent du modèle "standard" possédant une usine de centre de tri (caractéristiques au tableau 2.5). Or, comme indiqué au tableau 5.6 (version complète en Annexe 6.3), atteindre une capacité non-restrictive nécessite en réalité une capacité de 8 600 tonnes. Cette quantité permet de répondre à la croissance annuelle des déchets. A partir de cette quantité, le modèle simulera une capacité "illimitée". Cette valeur de 8 600 tonnes est trouvée en calculant le flux maximal que pourrait prendre HA-TU, le flux de déchets allant des habitants vers le tri en usine. Afin de minimiser la mise en décharge, tous les déchets doivent être triés et 36 % sont déjà triés au préalable. Le nombre de tonnes de déchets à trier la 30^{ème} année s'inspire de l'équation 3.13 en s'exprimant de

cette manière :

$$HA-TU(t=30) = (1 - 0,36) * 10000 * (1 + 0.01)^{(30-1)} = 8540,82 \quad (5.2)$$

Année	Capacité exploitée (tonne)	Capacité maximale (tonne)
1	6 400	8 600
5	6 659,87	8 600
10	6 999.58	8 600
15	7 356.64	8 600
20	7 731.90	8 600
25	8 126.30	8 600
30	8 540.82	8 600

Table 5.6: *Les capacités exploitées et maximales du centre de tri associées à l'objectif 2 où la capacité devient non-restrictive.*

Pour augmenter la crédibilité de ce modèle alternatif, il serait nécessaire de modifier certaines caractéristiques de l'usine de tri. Accroître sa capacité jusqu'à une consommation annuelle de 8 600 tonnes nécessitera des investissements supplémentaires. Les deux solutions les plus probables sont l'agrandissement du centre actuel pour traiter une plus grande quantité de déchets ou la création d'un second centre de tri (coût fixe de construction faible).

5.3.3 Objectif 3 : minimisation du coût total avec restrictions sur les décharges

Dans ce dernier cas, la solution optimale est obtenue avec la création et l'utilisation du centre de tri. En effet, les variables indicatrices valent toutes l'unité (tableau 4.2).

Il est donc intéressant d'analyser l'influence d'une augmentation du centre de tri sur l'objectif. Le tableau 5.7 permet de visualiser rapidement qu'une capacité supérieure ne serait pas utile. Le centre de tri est sous-exploité par rapport à sa capacité maximale sur la période des 30 années. Il n'y a donc aucun bénéfice à réaliser. Au contraire, les coûts associés à un agrandissement du centre de tri augmenteraient considérablement le coût total.

Année	Capacité exploitée (tonne)	Capacité maximale (tonne)
1	2 317.98	5 000
5	2 412.11	5 000
10	2 535.15	5 000
15	2 664.47	5 000
20	2 800.38	5 000
25	2 943.23	5 000
30	3 093.36	5 000

Table 5.7: *Les capacités exploitées et maximales du centre de tri associées à l'objectif 3.*

Chapitre 6

Conclusion

Ce travail cherchait à résoudre un problème de gestion des déchets sur une période de 30 ans pour une situation donnée. Grâce à l'utilisation du logiciel GAMS, nous avons pu obtenir une solution pour chacun des trois objectifs. Pour rappel, le premier était une minimisation du coût total, le deuxième une minimisation de la mise en décharge, et le troisième une minimisation du coût total avec des restrictions sur la mise en décharge.

Sur le plan économique, qui évalue ces différents buts en fonction de leur coût, l'objectif 1 est logiquement plus performant que les deux autres (78 millions), l'objectif 2 étant le plus coûteux (125 millions). On constate que la minimisation du coût est issue de la non-crédation du centre de tri, absent de la solution du premier objectif mais présent pour les deux suivants. Sur le plan écologique, c'est la quantité de déchets mis en décharge qui nous permet d'apprécier la performance des objectifs (plus elle est élevée, moins le bilan écologique est bon). L'objectif 2 est supérieur aux deux autres dans ce registre (42 489 tonnes), le premier présentant le plus mauvais bilan (122 536 tonnes). Les variations entre objectifs sont donc plus importantes pour cet aspect. Pour les deux dimensions présentées ci-dessus, l'objectif 3 occupe une position intermédiaire, confirmant son statut de compromis, avec un coût de 116 millions et 104 354 tonnes mises en décharge. Nous avons également observé les évolutions possibles sur le long terme en analysant la situation sur une période supérieure à 30 ans. On y constate les limites de l'objectif 1 en termes de durabilité, l'objectif 2 y répondant beaucoup mieux. L'objectif 3 apparaît lui comme idéal car moins coûteux que le deuxième et plus durable que le premier.

Nous avons ensuite pris en considération plusieurs scénarios envisageables. Celui d'une taxe sur les immondices met en lumière la possibilité de changer les habitudes de consommation des habitants et ainsi diminuer les déchets à la source, mais c'est miser sur la conscience collective. Dans le cas d'un affaiblissement de restriction sur la décharge de cendres, on constate qu'une variation de 5 % induit un rapprochement significatif de l'objectif 3 vers l'objectif 1. L'augmentation de la capacité du centre de tri a enfin été envisagée. Elle n'a pas de conséquence sur l'objectif 1 étant donné qu'il ne l'utilise pas

dans sa solution. Elle permet en revanche de diminuer les déchets mis en décharge pour l'objectif 2 (29 493 tonnes). Le coût monte alors cependant à 151 millions. L'objectif 3 est quant à lui négativement impacté par ce scénario, car il sous-exploite le centre de tri (il y aurait donc une augmentation des coûts non justifiée à cause de l'agrandissement du centre de tri).

Il apparaît ainsi évident qu'un changement dans notre gestion quotidienne des déchets produits par la société est nécessaire pour éviter une catastrophe écologique. Sur le long terme, la priorisation d'un coût minimal au détriment de l'environnement pourrait en effet se montrer désastreux. Le prix à payer pour préserver les écosystèmes de la pollution est cependant trop élevé pour ne pas soulever la question du financement. La solution la plus réaliste qui en ressort est donc, comme le confirme notre analyse, de combiner un objectif de minimisation des coûts avec des contraintes écologiques (plafond sur la mise en décharge), de manière à faire émerger un système hybride, qui, à défaut d'être parfait, minimisera simultanément les impacts négatifs économiques et écologiques. Les chiffres ont rendu leur verdict, c'est donc désormais aux communautés politiques locales et globales d'agir, en connaissance de cause.

Bibliographie

- [1] Dan HOORNWEG et Perinnaz BHADA-TATA. Environment: Waste production must peak this century. *nature*, 502:615–617, 2013.
- [2] ADEME. *Campagne nationale de caractérisation des ordures ménagères, résultats Année 2007*, Juin 2009.
- [3] Véronique REIX. Le prix de la mise en décharge des déchets non dangereux générés par les collectivités en 2005, Mars 2006.
- [4] Omnil Conseil. Gestion des mâchefers issus des déchets genevois, rapport version 4.1, Janvier 2018.
- [5] Le Dauphiné. Un avis défavorable pour le centre d’enfouissement des ordures ménagères, article du 12/02/2018.
- [6] Le Dépêche. Le futur centre d’enfouissement s’ouvre aux élus et responsables associatifs, article du 05/08/2004.
- [7] Aube Durable. *Tout savoir sur le projet d’incinérateur*, 28 mars 2018.
- [8] Christine MANCHERON. *Enquête sur les prix de l’incinération des déchets municipaux*. ADEME, Novembre 2011.
- [9] Planète Énergies. L’incinération : le pouvoir calorifique des ordures, 29 août 2014.
- [10] EUROSTAT. Price developments and volume trade of paper waste eu-28, Janvier 2019.
- [11] EUROSTAT. Price developments and volume trade of plastic waste eu-28, février 2019.
- [12] EUROSTAT. Price developments and volume trade of glass waste eu-28, mai 2019.
- [13] Eco-Emballages. Concevoir, construire et exploiter un centre de tri, 2005.
- [14] D. De wolf. *Gestion de la production et modélisation*. Université Catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve.

Annexes

6.1 Code GAMS

Cette première annexe présente l'ensemble du code GAMS qui a permis de résoudre ce problème d'optimisation à plusieurs contraintes. Pour comprendre ce dernier, une remarque est nécessaire. En effet, pour faciliter la lecture du code, les trois objectifs et l'ensemble des contraintes sont réunis. Ceci est possible car la plupart des lignes sont similaires. Le code ci-dessous est celui utilisé pour résoudre l'objectif 1 de minimisation du coût. L'objectif et les contraintes pour analyser et interpréter l'objectif 2 sont repris en commentaires en commençant par le symbole "***". En ce qui concerne l'objectif 3, deux contraintes étaient à ajouter et sont également reprises en commentaires, commençant par le symbole "***".

Le code contient par ordre chronologique les éléments suivants : les indices (SETS), les données (SCALAR), les paramètres (PARAMETERS), l'ensemble des variables (VARIABLES) avec leur condition d'existence et les équations regroupant les fonctions objectifs et les contraintes (EQUATIONS).

* UCLouvain - Louvain School of Management
 * Master [60] en sciences de gestion
 * Année académique 2019-2020
 * Auteurs : Etienne CLAISSE & Antoine VERSLYPE
 * Promoteur : Daniel DE WOLF

* Problème d'investissement dans la gestion des déchets

SETS

T toutes les années de 1 a 30 /1 * 30/ ;

SCALAR

* Coûts variables des activités en €/tonne (coût négatif correspond à un gain)
 CDD coût de la décharge de déchets / 52 /
 CDC coût de la décharge de cendres / 91.35/
 CTU coût du tri en usine / 300 /
 CTS coût du tri à la source / 0 /
 CIN coût de l'incinérateur / 150 /
 CPA coût du papier recyclé / -133 /
 CPL coût du plastique recyclé / -335 /
 CME coût des métaux recyclés / -255 /
 CVE coût du verre recyclé / -55 /
 * Prix de vente de l'énergie en €/kwh (coût négatif correspond à un gain)
 CEN coût de l'énergie récupérée / -0.15/
 * Coûts fixes de construction en millions d'€
 KDD coût de construction de la décharge de déchets / 38 /
 KDC coût de construction de la décharge de cendres / 10 /
 KIN coût de construction de l'incinérateur / 78 /
 KTU coût de construction du centre de tri / 2.72 /
 * Énergie récupérée avec l'incinérateur en kwh/tonne
 ENHA énergie récupérée par tonne de déchets non triés /3138.01/
 ENTRI énergie récupérée par tonne de déchets triés /2208.16/
 * Pourcentage de cendres en fonction du flux de déchets
 CEHA pourcentage de cendres pour des déchets non triés /0.2393 /
 CETRI pourcentage de cendres pour des déchets triés /0.1804 /
 ;

PARAMETERS Tset les années sous forme de paramètres ;

Tset(T)=1;

* Le paramètre "actual(T)" est créé pour utiliser le temps comme exposant dans les contraintes

PARAMETERS actual(T) /1 1,2 2,3 3,4 4,5 5,6 6,7 7,8 8,9 9,10 10,11 11,12 12,13
 13,14 14,15 15,16 16,
 17 17,18 18,19 19,20 20,21 21,22 22,23 23,24 24,25 25,26 26,
 27 27,28 28,29 29,30 30/;

VARIABLES

* Les variables ci-dessous représentent les 19 variables de contrôle

* Ces variables sont des flux de déchets exprimés en tonnes

HADD(T) quantité de déchets allant des habitants vers la décharge de déchets

HATS(T) quantité de déchets triés à la source par les habitants

HATU(T) quantité de déchets allant des habitants vers le centre de tri

HAIN(T) quantité de déchets allant des habitants vers l'incinérateur

TSDD(T) quantité de déchets triés à la source se dirigeant vers la décharge de déchets

TSPA(T) quantité de déchets triés à la source se dirigeant vers le marché des

papiers recycles

TSVE(T) quantite de dechets tries a la source se dirigeant vers le marche des verres recycles

TSPL(T) quantite de dechets tries a la source se dirigeant vers le marche des plastiques recycles

TSME(T) quantite de dechets tries a la source se dirigeant vers le marche des metaux recycles

TSIN(T) quantite de dechets tries a la source se dirigeant vers l'incinerateur

TUDD(T) quantite de dechets tries a l'usine se dirigeant vers la decharge de dechets

TUPA(T) quantite de dechets tries a l'usine se dirigeant vers le marche des papiers recycles

TUVE(T) quantite de dechets tries a l'usine se dirigeant vers le marche des verres recycles

TUPL(T) quantite de dechets tries a l'usine se dirigeant vers le marche des plastiques recycles

TUME(T) quantite de dechets tries a l'usine se dirigeant vers le marche des metaux recycles

TUIN(T) quantite de dechets tries a l'usine se dirigeant vers l'incinerateur

INME(T) quantite de metaux allant de l'incinerateur vers le marche des metaux recycles

INDC(T) quantite de cendres allant de l'incinerateur vers la decharge de cendres

* Cette variable exprime un flux d'energie exprime en kwh

INEN(T) quantite d'energie recuperee a l'incinerateur

* Les variables indicatrices

yDD indicatrice de la construction de la decharge de dechets

yDC indicatrice de la construction de la decharge de cendres

yTU indicatrice de la construction du centre de tri

yIN indicatrice de la construction de l'incinerateur

* Variable decrivant les objectifs

W quantite minimum de dechets en decharge (objectif 2)

Z cout total minimum de l'investissement (objectif 1 et 3)

* Variable servant a l'analyse du probleme

C cout de l'objectif de minimisation de la decharge

TOT quantite totale de dechets sur les 30 annees ;

POSITIVE VARIABLES

HADD, HATS, HATU, HAIN, TSDD, TSPA, TSVE, TSPL, TSME, TSIN,

TUDD, TUPA, TUVE, TUPL, TUME, TUIN, INME, INDC, INEN;

BINARY VARIABLES

yDD, yDC, yTU, yIN ;

EQUATIONS

COUT definit le cout total comprenant les couts fixes et variables (fonction objectif 1 et 3)

** QUANTITEDECHARGE definit la quantite totale mise en decharge (fonction objectif 2)

QUANTITEANNUEL(T) definit la quantite annuelle de dechets en fonction du taux de croissance

PAPIERTS(T) definit la quantite annuelle de dechets tries a la source allant

```

vers le marche du papier recycle
    PAPIERTU(T) definit la quantite annuelle de dechets tries a l'usine allant
vers le marche du papier recycle
    VERRETS(T) definit la quantite annuelle de dechets tries a la source allant
vers le marche du verre recycle
    VERRETU(T) definit la quantite annuelle de dechets tries a l'usine allant
vers le marche du verre recycle
    PLASTICTS(T) definit la quantite annuelle de dechets tries a la source allant
vers le marche du plastique recycle
    PLASTICTU(T) definit la quantite annuelle de dechets tries a l'usine allant
vers le marche du plastique recycle
    METAUXTS(T) definit la quantite annuelle de dechets tries a la source allant
vers le marche des metaux recycles
    METAUXTU(T) definit la quantite annuelle de dechets tries a l'usine allant
vers le marche des metaux recycles
    BILANINCMETAUX(T) definit le bilan annuel des metaux a l'incinerateur
    DECHETSOURCE(T) definit la quantite annuelle de dechets tries par les habitants
    DCDEPENDANCEIN definit une contrainte sur l'existence de la decharge de cendre
    BILANTS(T) definit le bilan annuel des flux de dechets pour le tri a la source
    BILANTU(T) definit le bilan annuel des flux de dechets pour le tri a l'usine
    BILANCENDRE(T) definit le bilan annuel des cendres a l'incinerateur
    BILANENERGIE(T) definit le bilan annuel de l'energie recuperee a l'incinerateur
    CAPTU(T) definit la capacite annuelle du centre de tri
    CAPDD definit la capacite de la decharge de dechets sur toute la periode
    CAPDC definit la capacite de la decharge de cendres sur toute la periode
    CAPIN(T) definit la capacite annuelle de l'incinerateur
    DECHETTOTAL definit la quantite totale de dechets sur toute la periode (utile
pour calculer la taxe d'immondice)
    TOTDECHARGE definit la quantite totale de dechets mise en decharge sur toute la
periode (utile pour comparer les dechets en decharge entre objectif)

* Equation supplementaire a rajouter pour calculer le cout de l'objectif 2
** COUT2 definit le cout dans la situation de minimisation de la decharge

* Contraintes supplementaires a rajouter pour realiser l'objectif 3
*** LIMITEDD(T) definit une quantite maximale annuel de dechets en decharge de
dechets
*** LIMITEDC(T) definit une quantite maximale annuel de cendres en decharge de
cendres
;

COUT.. Z =E= SUM(T, HADD(T)*CDD + HATU(T)*CTU + HAIN(T)*CIN + HATS(T)*CTS
+ TSDD(T)*CDD + TSPA(T)*CPA + TSVE(T)*CVE + TSPL(T)*CPL +
TSME(T)*CME + TSIN(T)*CIN
+ TUDD(T)*CDD + TUPA(T)*CPA + TUBE(T)*CVE + TUPL(T)*CPL +
TUME(T)*CME + TUIN(T)*CIN
+ INME(T)*CME + INDC(T)*CDC + INEN(T)*CEN)
+ (KDD*yDD + KDC*yDC + KIN*yIN + KTU*yTU)*10**6 ;

** QUANTITEDECHARGE.. W =E= SUM(T, HADD(T) + TSDD(T) + TUDD(T) + INDC(T)) ;

QUANTITEANNUEL(T).. HADD(T)+ HATS(T)+ HATU(T) + HAIN(T)=E=
10000*(1+0.01)**(actualT(T)-1) ;

PAPIERTS(T).. TSPA(T)=E= 0.25*HATS(T);

PAPIERTU(T).. TUPA(T)=E= 0.25*HATU(T);

VERRETS(T).. TSVE(T) =E= 0.13*HATS(T) ;

```

```

VERRETU(T).. TUVE(T) =E= 0.13*HATU(T) ;

PLASTICTS(T).. TSPL(T) =E= 0.11*HATS(T) ;

PLASTICTU(T).. TUPL(T) =E= 0.11*HATU(T) ;

METAUXTS(T).. TSME(T) =E= 0.04*HATS(T) ;

METAUXTU(T).. TUME(T) =E= 0.04*HATU(T) ;

BILANINCMETAUX(T).. INME(T) =E= 0.04*HAIN(T) ;

DECHETSOURCE(T).. HATS(T) =E= 0.36*10000*((1+0.01)**(actualT(T)-1)) ;

DCDEPENDANCEIN.. yDC =E= yIN ;

BILANTS(T).. TSDD(T) + TSIN(T) + TSPA(T) + TSVE(T) + TSPL(T) + TSME(T) =E=
HATS(T) ;

BILANTU(T).. TUDD(T) + TUIN(T) + TUPA(T) + TUVE(T) + TUPL(T) + TUME(T) =E=
HATU(T) ;

BILANCENDRE(T).. INDC(T) =E= CEHA*HAIN(T) + CETRI*(TUIN(T) + TSIN(T)) ;

BILANENERGIE(T).. INEN(T) =E= 0.75*(ENHA*HAIN(T)+ ENTRI*(TSIN(T) + TUIN(T))) ;

CAPTU(T).. HATU(T) =L= 5000*yTU ;

CAPDD.. SUM(T,HADD(T) + TSDD(T) + TUDD(T)) =L= 20000*yDD ;

CAPDC.. SUM(T,INDC(T)) =L= 50000*yDC ;

CAPIN(T).. HAIN(T) + TUIN(T) + TSIN(T) =L= 7500*yIN ;

DECHETTOTAL.. TOT =E= SUM(T,10000*(1+0.01)**(actualT(T)-1)) ;

TOTDECHARGE.. W =E= SUM(T, HADD(T) + TSDD(T) + TUDD(T) + INDC(T));

** COUT2.. C =E= SUM(T, HADD(T)*CDD + HATU(T)*CTU + HAIN(T)*CIN + HATS(T)*CTS
**           + TSDD(T)*CDD + TSPA(T)*CPA + TSVE(T)*CVE + TSPL(T)*CPL +
TSME(T)*CME + TSIN(T)*CIN
**           + TUDD(T)*CDD + TUPA(T)*CPA + TUVE(T)*CVE + TUPL(T)*CPL +
TUME(T)*CME + TUIN(T)*CIN
**           + INME(T)*CME + INDC(T)*CDC + INEN(T)*CEN)
**           + (KDD*yDD + KDC*yDC + KIN*yIN + KTU*yTU)*10**6 ;

*** LIMITEDD(T).. HADD(T) + TSDD(T) + TUDD(T) =L= 0.2*10000*(1+0.01)**(actualT(T)-
1) ;

*** LIMITEDC(T).. INDC(T) =L= 0.1*10000*(1+0.01)**(actualT(T)-1) ;

MODEL INVESTISSEMENT /ALL/ ;

SOLVE INVESTISSEMENT USING MIP MINIMIZING Z;

**SOLVE INVESTISSEMENT USING MIP MINIMIZING W;

```


6.2 Analyse des conséquences de la contrainte sur les déchets envoyés en décharge

Année	Déchets vers DD en tonnes (objectif 1)	Déchets vers DD en tonnes (objectif 3)	Restriction sur DD en tonnes
1	1 692	2 000	2 000
2	1 708.92	2 020	2 020
3	1 726.01	2 040.20	2 040.20
4	1 743.27	2 060.60	2 060.60
5	1 760,70	2 081,21	2 081,21
6	1 778.31	2 102.02	2 102.02
7	1 796.09	2 123.04	2 123.04
8	1 814.05	2 144.27	2 144.27
9	1 832.19	2 165.71	2 165.71
10	8 358,10	2 187,37	2 187,37
11	1 869.02	2 209.24	2 209.24
12	1 887.71	2 231.34	2 231.34
13	1 906.59	2 253.65	2 253.65
14	1 925.65	2 276.19	2 276.19
15	1 944,91	2 298,95	2 298,95
16	1 964.56	2 321.94	2 321.94
17	1 988.5	2 345.16	2 345.16
18	2 083.39	2 368.61	2 368.61
19	2 179.22	2 392.29	2 392.29
20	2 276,02	2 416,22	2 416,22
21	2 373.78	2 440.38	2 440.38
22	2 472.52	2 464.78	2 464.78
23	2 572.24	2 489.43	2 489.43
24	2 672.96	2 514.33	2 514.33
25	2 774.69	2 539,47	2 539,47
26	2 877.43	2 564.86	2 564.86
27	2 981.21	2 590.51	2 590.51
28	3 086.03	2 616.42	2 616.42
29	3 191.88	2 642.58	2 642.58
30	3 298,81	2 669,01	2 669,01
Total	72 536,59	69 569,78	69 569,78

Table 6.1: *Analyse des conséquences de l'équation 3.3 sur les quantités envoyées en décharge de déchets (version complète).*

6.3 Modification de la capacité du centre de tri vers une capacité non-restrictive

Année	Capacité exploitée (tonne)	Capacité maximale (tonne)
1	6 400	8 600
2	6 464	8 600
3	6 528.64	8 600
4	6 593.93	8 600
5	6 659.86	8 600
6	6 726.46	8 600
7	6 793.73	8 600
8	6 861.67	8 600
9	6 930.28	8 600
10	6 999.56	8 600
11	7 069.58	8 600
12	7 140.28	8 600
13	7 211.68	8 600
14	7 283.80	8 600
15	7 356.66	8 600
16	7 430.20	8 600
17	7 504.50	8 600
18	7 579.55	8 600
19	7 655.34	8 600
20	7 731.90	8 600
21	7 809.22	8 600
22	7 887.31	8 600
23	7 966.18	8 600
24	8 045.84	8 600
25	8 126.30	8 600
26	8 207.56	8 600
27	8 289.64	8 600
28	8 372.54	8 600
29	8 456.26	8 600
30	8 540.82	8 600

Table 6.2: Les capacités exploitées et maximales du centre de tri associées à l'objectif 2 où la capacité devient non restrictive (version complète).

6.4 Modification de la restriction sur la décharge de cendres

Année	IN-DC en tonnes (actuelle)	Restriction sur DC en tonnes (actuelle)	IN-DC en tonnes (alternative)	Restriction sur DC en tonnes (alternative)
1	1 000	1 000	1 457.82	1 500
2	1 010	1 010	1 472.39	1 515
3	1 020.1	1 020.1	1 487.12	1 530.15
4	1 030.3	1 030.3	1 501.99	1 545.45
5	1 040.60	1 040.60	1 517.01	1 560.91
6	1 051.01	1 051.01	1 532.18	1 576.52
7	1 061.52	1 061.52	1 547.5	1 592.28
8	1 072.14	1 072.14	1 562.98	1 608.2
9	1 082.86	1 082.86	1 578.61	1 624.29
10	1 093.69	1 093.69	1 594.39	1 640.53
11	1 104.62	1 104.62	1 610.34	1 656.93
12	1 115.67	1 115.67	1 626.44	1 673.5
13	1 126.83	1 126.83	1 642.7	1 690.24
14	1 138.09	1 138.09	1 659.13	1 707.14
15	1 149.47	1 149.47	1 675.72	1 724.21
16	1 160.97	1 160.97	1 692.48	1 741.45
17	1 172.58	1 172.58	1 709.4	1 758.87
18	1 184.3	1 184.3	1 726.5	1 776.46
19	1 196.15	1 196.15	1 743.76	1 794.22
20	1 208.11	1 208.11	1 761.2	1 812.16
21	1 220.19	1 220.19	1 778.81	1 830.29
22	1 232.39	1 232.39	1 794.75	1 848.59
23	1 244.72	1 244.72	1 794.75	1 867.07
24	1 257.16	1 257.16	1 794.75	1 885.74
25	1 269.73	1 269.73	1 794.75	1 904.6
26	1 282.43	1 282.43	1 794.75	1 923.65
27	1 295.26	1 295.26	1 794.75	1 942.88
28	1 308.21	1 308.21	1 776.95	1 962.31
29	1 321.29	1 321.29	1 790.03	1 981.94
30	1 334.5	1 334.5	1 786.06	2 001.76

Table 6.3: *Descriptif des quantités de cendres des deux possibilités pour l'objectif 3 (version complète).*

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