

Louvain School of Management

Gestion des déchets ménagers

Auteur : Brice Gavazza
Promoteur : Prof. Daniel De Wolf
Lecteur : Prof. Daniel De Wolf
Année académique 2019-2020
Master complémentaire [60] en sciences de gestion

Résumé

Ce mémoire traite de la gestion des déchets ménagers en France. Cette problématique est devenue préoccupante au regard de la croissance démographique et de l'augmentation du volume de déchets par habitant.

Il n'est plus acceptable d'opter pour une solution du tout à la décharge à cause de la pollution qu'elle entraîne. D'autres alternatives sont envisagées telles que l'incinération et le recyclage. Mais cela a un coût. Ce mémoire vise à déterminer la charge financière du traitement des déchets d'une collectivité locale en fonction de 3 scénarios représentant 3 sensibilités politiques, une plus économique, l'autre plus écologique et la troisième qui est celle du compromis entre les 2 premières.

Après formulation des différents modèles correspondant à ces visions, il faut transcrire ceux-ci sur le programme GAMS dans le but d'obtenir une simulation sur 10 ans.

Cette simulation a donné des taxes immondices de 0,25 €/kg pour la vision économique, 0,30 €/kg pour la vision écologique et 0,38 €/kg pour le compromis.

Remerciements

Ce mémoire n'aurait pu être mené à son terme sans la précieuse aide de nombreuses personnes à qui je tiens à exprimer ma plus grande reconnaissance à travers ces quelques lignes.

Il est évident que je tiens à commencer par remercier mon promoteur Pr. Daniel De Wolf qui m'a apporté de judicieux conseils et a fait preuve d'une grande disponibilité. Je le remercie d'avoir pris de son précieux temps pour réaliser les corrections qui ont permis l'écriture de ce travail de fin d'études.

Il me tient également à cœur de remercier ma maman qui a corrigé l'orthographe de tous mes travaux jusqu'à présent et qui l'a fait avec bienveillance.

D'un point de vue plus personnel, je veux souligner à quel point cette année n'aurait pu être plus parfaite et cela, grâce à mon cokoteur et mes amis en or, une team GEST2M1 de feu, des rencontres à LiG plus que sympathiques et une famille de rêve.

Table des matières

I.	Introduction.....	1
II.	Présentation du problème	2
1.	Mise en décharge	2
2.	Incinération	2
3.	Recyclage.....	5
4.	Réduction à la source	5
5.	Données numériques	6
5.1.	Coût de la mise en décharge	6
5.2.	Données concernant la centrale déchets-énergie	7
5.3.	Données concernant la production de déchets	7
5.4.	Données concernant le recyclage	8
6.	Objectifs de la modélisation.....	9
III.	Formulation du problème	10
1.	Diagramme de réseau	10
2.	Choix des variables de contrôle.....	11
3.	Définition des contraintes	12
4.	Définition des objectifs.....	16
IV.	Structure du problème et algorithme de résolution sur GAMS.....	18
V.	Analyse des résultats	22
VI.	Analyse de sensibilité du modèle GAMS	25
VII.	Conclusion.....	27
VIII.	Bibliographie	28
	Annexe A : Ecriture du modèle dans GAMS	29
	Annexe B : Résultats donnés par GAMS	31

Liste des tableaux

Tableau 1: Caractéristiques des déchets.....	3
Tableau 2: Capacités et coûts de mise en décharge.....	7
Tableau 3: Capacité et coûts d'incinération.....	7
Tableau 4: Prix de revente des matériaux recyclés	8
Tableau 5: Capacité annuelle et coûts du centre de tri	8
Tableau 6: Tableau Excel permettant d'obtenir le paramètre VCDNT	14
Tableau 7: Tableau Excel permettant d'obtenir le paramètre VCDT	15
Tableau 8: Tableau Excel permettant d'obtenir le paramètre TCDNT.....	15
Tableau 9: Tableau Excel permettant d'obtenir le paramètre TCDDT	16
Tableau 10: Synthèse des coûts variables, quantités mises en décharge et recyclées des trois alternatives sur 10 ans.	18
Tableau 11: Flux de QDeTS par année en fonction du modèle	19
Tableau 12: Flux de QDeTU par année en fonction du modèle.....	20
Tableau 13: Flux de QDeIn par année en fonction du modèle.....	20
Tableau 14: Flux de QDeMD par année en fonction du modèle.....	21
Tableau 15: Coûts fixes sur une période de 10 ans en fonction du modèle de traitement des déchets	22
Tableau 16: Coût total du traitement des déchets sur une période de 10 ans en fonction du modèle de traitement des déchets.....	23
Tableau 17: Taxe immondice en fonction du modèle de traitement de déchets	25

Liste des figures

Figure 1: Mise en décharge	2
Figure 2: Composition du panier de déchets ménager moyen français en 2008.....	3
Figure 3: Schéma d'une centrale déchets-énergie	4
Figure 4: Diagramme de réseau représentant le problème de traitement des déchets.....	11
Figure 5: Diagramme de réseau avec les différents flux de la première année de simulation .	19
Figure 6: Coût variable du modèle 1	31
Figure 7: Quantité de déchets mis en décharge pour le modèle 2	31
Figure 8: Coût variable du modèle 3	31
Figure 9: Contrainte (22) et son prix caché en fonction des années pour le modèle 3	32
Figure 10: Coût du modèle 3 suite à l'augmentation de la contrainte (22) de 5 % et à l'augmentation de 100 €/t du traitement des cendres	32
Figure 11: Contrainte (15) et son prix caché en fonction des années pour le modèle 1.....	32
Figure 12: Contrainte (15) et son prix caché en fonction des années pour le modèle 3.....	33
Figure 13: Coût variable du modèle 2	33
Figure 14: Coût variable du modèle 2 avec augmentation d'une unité de la contrainte (15) ...	33

I. Introduction

Ce mémoire traite de la gestion des déchets ménagers en France. Cette problématique est devenue de plus en plus préoccupante. En effet, au regard de la croissance démographique constante ainsi que de l'augmentation du volume de déchets par habitant, il n'est plus acceptable d'opter pour une solution du tout à la décharge à cause de la pollution qu'elle entraîne.

Des alternatives peuvent être envisagées telles que l'incinération et le recyclage. Ainsi, une partie des déchets peut être incinérée pour récupérer l'énergie produite et une partie des déchets recyclables peut être réutilisée. Ce mémoire vise à déterminer la charge financière du traitement des déchets d'une collectivité locale en fonction de 3 scénarios représentant 3 sensibilités politiques, une plus économique, l'autre plus écologique et la troisième qui est celle du compromis entre les 2 premières. Pour ce faire, 3 méthodes seront envisagées, à savoir la mise en décharge, l'incinération et le recyclage.

Le premier chapitre sera consacré à la présentation des différentes méthodes de traitement des déchets puis aux données numériques qu'il faudra utiliser dans la modélisation du problème. Enfin il s'attachera à décrire les différents objectifs recherchés en fonction des choix politiques en la matière.

Ensuite viendra la formulation du problème avec la représentation de celui-ci par un diagramme de réseau et l'élaboration des contraintes et objectifs.

Après avoir formulé le problème, la structure de l'algorithme de résolution utilisant le programme GAMS sera expliqué et les résultats issus de celui-ci seront présentés.

Enfin, une analyse des résultats obtenus ainsi qu'une analyse de sensibilité de ceux-ci clôtureront ce travail.

II. Présentation du problème

1. Mise en décharge

Une décharge est un lieu où l'on stocke les déchets en les enfouissant généralement dans le sol. Cette technique reste dans la majorité des cas une étape incontournable du traitement des déchets.

Les conséquences de ce procédé, trop longtemps ignorées, sont la pollution de l'eau (par infiltration des nappes) et la pollution de l'air (par dégagement de gaz). Afin de protéger les nappes phréatiques, il est devenu nécessaire d'installer dans les décharges une couche imperméable de protection qui collecte les eaux d'infiltration (Fig. 1) avant de les envoyer vers une station de retraitement.

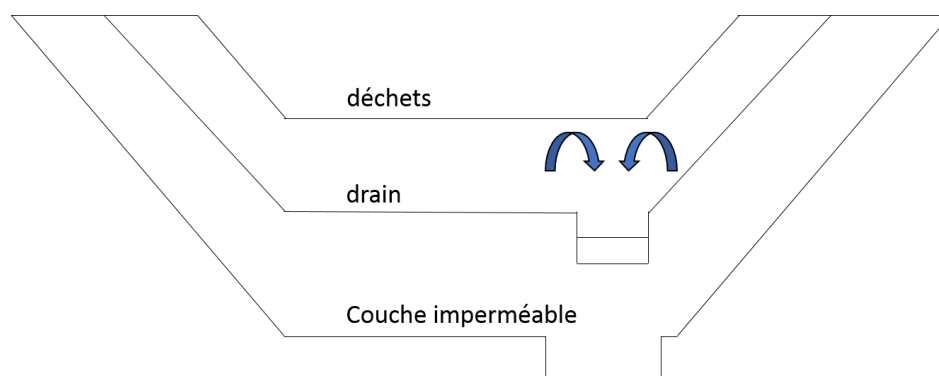


Figure 1: Mise en décharge

Sans cette installation, la mise en décharge est devenue sanitairesment inacceptable mais cela entraîne une augmentation des coûts. Il faut donc maintenant inclure dans le prix de mise en décharge les coûts de construction et de maintenance du système d'épuration. Il est à noter que les prix de la couche imperméable varient en fonction de la nature perméable ou non des sols.

2. Incinération

L'incinération des déchets consiste à les brûler jusqu'à ce qu'ils deviennent des cendres. C'est une méthode qui permet de réduire jusqu'à 90 % le volume total des déchets. La réduction de masse quant à elle varie de 60 % à 75 % en fonction de la composition des déchets. En plus de réduire la quantité de déchets à mettre en décharge, l'énergie dégagée peut être récupérée sous forme d'électricité ou de chaleur.

D'après les constatations de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) en 2007 [1], la composition du panier moyen de déchets ménagers français a peu évolué en 15 ans et les caractéristiques de celui-ci sont représentées par le tableau 1 ci-dessous.

Tableau 1: Caractéristiques des déchets [1]

	POIDS MOUILLE (KG)	TENEUR EN EAU (%)	VALEUR CALORIFIQUE SECHE (KCAL/KG)	CENDRE (%)
NOURRITURE	0,29	72	4713	4,5
PAPIER	0,25	10	4207	5,4
VERRE	0,13	0	0	100,0
PLASTIQUES	0,11	2	7982	10,0
POUSSIÈRE	0,10	3	2106	70,0
TEXTILES	0,08	10	4250	2,2
METAUX	0,04	0	412	100,0
	1,00	24,70	3607,56	27,93

Ce tableau est illustré par la Figure 2 ci-dessous.

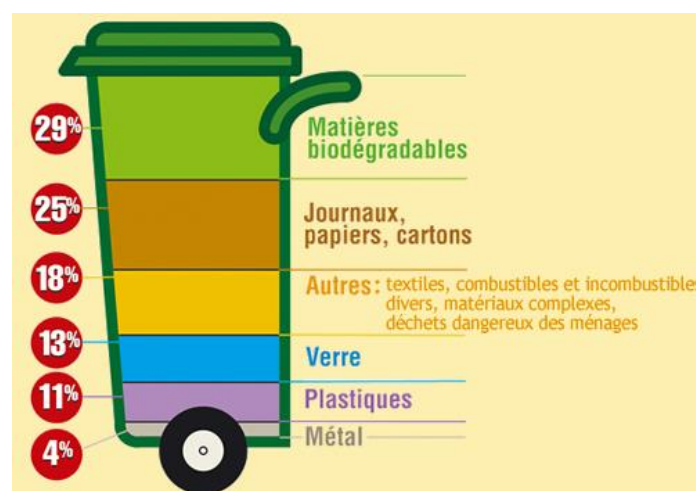


Figure 2: Composition du panier de déchets ménager moyen français en 2008 (https://www.notre-planete.info/ecologie/dechets/dechets_menagers.php)

Un déchet ménager typique a un pouvoir calorifique (sur base sèche) de 3.608 kcal/kg. A titre de comparaison, le pouvoir calorifique du bois est de 4.790 kcal/kg et celui du pétrole d'environ 10.500 kcal/kg. En France, on estime que 1 kg de déchets ménagers sont collectés par personne et par jour. La production de déchets annuelle de la France représente donc $21,17 \times 10^6$ tonnes, soit $5,88 \times 10^{10}$ kWh par an. Ceci équivaut à deux grandes centrales électriques. Il s'agit donc d'une source d'énergie non négligeable.

Un incinérateur avec équipement de reconversion énergétique est appelé centrale déchets-énergie (*waste to energy plant*) (voir Figure 3). La chaleur produite dans le brûleur est utilisée pour produire de la vapeur qui est elle-même utilisée pour produire de l'électricité grâce à des turbines ou bien directement exploitée pour le chauffage urbain. L'utilisation d'un « incinérateur avec récupération d'énergie » est généralement plus coûteuse à la construction et à l'exploitation que la simple mise en décharge.

Un des inconvénients de cette alternative est la production d'un air hautement corrosif. Un système sophistiqué de lavage de fumée doit être mis en œuvre avant le rejet des fumées à la haute tour (voir Figure 3). Les cendres produites doivent ensuite être transportées dans une décharge de cendres qui est différente de la décharge pour les déchets standards.

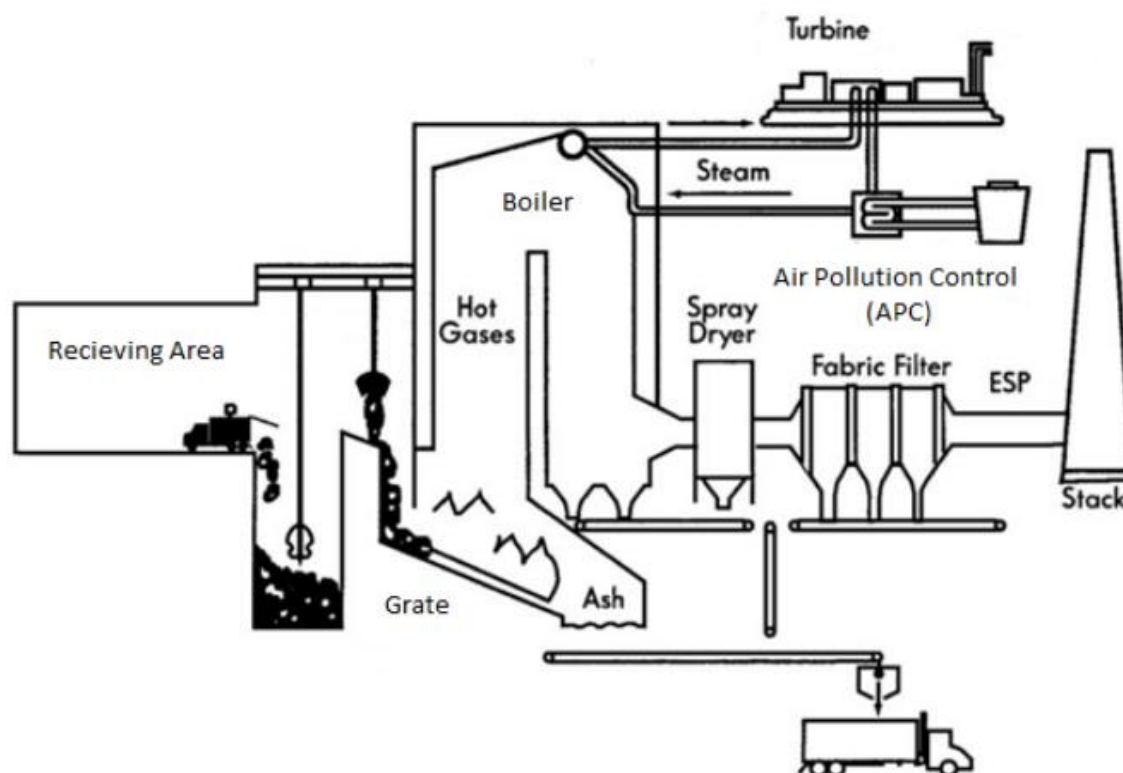


Figure 3: Schéma d'une centrale déchets-énergie (https://www.researchgate.net/figure/A-schematic-diagram-of-waste-to-energy-WtE-plant_fig1_337195570)

3. Recyclage

Le recyclage est une méthode qui nécessite évidemment un changement de comportement de la population. Comparée aux deux premières alternatives, son coût de mise en place est relativement faible mais nécessite la participation de la collectivité. Cette méthode requiert que les verres, les métaux et les papiers soient préalablement séparés des autres matériaux.

Certaines collectivités locales¹ fournissent des poubelles ou des sacs de couleurs différentes par type de déchets. D'autres invitent les particuliers à rapporter eux-mêmes leurs verres ou papiers dans des poubelles collectives.

Outre la participation de la collectivité au traitement des déchets, il est aussi possible de réaliser le tri dans un centre de tri de déchets. Ceci évite le tri à la source (chez les particuliers ou au bureau). Les déchets sont alors collectés et conduits dans un centre de tri où ils sont séparés, mis en paquet et envoyés vers un centre adapté de recyclage.

Les deux difficultés majeures du recyclage pour être viable sont :

- 1) Un nécessaire changement de mentalité car cette méthode demande la coopération des citoyens (pour le tri à la source)
- 2) La variabilité de la valorisation des matériaux recyclés qui est fortement dépendante du prix (par exemple, du prix du carton recyclé) et peut à la suite d'une chute de prix devenir économiquement non rentable.

4. Réduction à la source

La réduction à la source concerne principalement la production, le conditionnement et la distribution des produits finis. Il s'agit de l'alternative la plus intéressante à long terme puisqu'elle limite la production de déchets et permet une utilisation plus efficace de la matière première.

Malgré ses avantages, les industries rechignent à mettre en œuvre cette méthode dans leurs usines. Les raisons invoquées sont les investissements coûteux, le prix et l'incertitude sur l'adhésion de la part des consommateurs.

Prenons l'exemple des boissons. Si les vidanges sont réutilisables, des changements de comportement sont nécessaires aussi bien dans la pratique de production que de distribution.

¹ Structure administrative française, dotée de la personnalité morale, qui prend en charge les intérêts de la population d'un territoire déterminé.

https://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/collectivit%C3%A9_territoriale/35167

Les distributeurs doivent collecter les vidanges et les réexpédier vers les producteurs qui doivent ensuite les laver et les remplir à nouveau. Ceci occasionne des coûts supplémentaires chez le consommateur, le distributeur et le producteur. Actuellement, avec le système des emballages jetables, les producteurs et les distributeurs évitent ces coûts qui sont indirectement supportés par le consommateur sous forme d'une augmentation de leur taxe d'enlèvement des déchets ou l'augmentation du nombre de sacs PMC à acheter.

Mais les hommes politiques (par exemple les écologistes en Belgique) ont proposé une taxe sur les emballages non réutilisables pour favoriser l'utilisation d'emballages réutilisables en incluant les frais de traitement de ces déchets dans le prix d'achat. L'objectif est de sensibiliser le consommateur et de décourager l'achat d'emballages jetables en taxant le prix.

Si la réduction des déchets à la source est la méthode la plus intéressante, elle reste sans doute une des plus complexes à mettre en œuvre, même si le meilleur déchet est celui qui n'existe pas !

Cette alternative ne sera pas analysée dans ce mémoire puisque son objet est la gestion des déchets ménagers, ce qui présuppose qu'ils existent.

5. Données numériques

Cette section vise à répertorier toutes les données numériques dont a besoin le modèle pour obtenir des réponses pertinentes.

5.1. Coût de la mise en décharge

La capacité des décharges sur 30 ans ainsi que les frais variables de mise en décharge sont donnés au tableau 2 pour les deux types de décharge. Selon une étude de Véronique REIX [2], le coût moyen de mise en décharge de déchets non traités est de 52 € la tonne. Selon un rapport d'Omni Conseil [3], le coût de traitement pour mise en décharge des mâchefers (cendres) à Genève est de 101,5 CHF, soit 91,35 € la tonne. Suivant le journal Le Dauphiné [4], le coût fixe d'investissement dans une décharge pour ordures ménagères est de 38 millions d'euros. Suivant le journal La Dépêche [5], le coût fixe d'investissement dans un centre d'enfouissement technique de déchets de classe 2 est de 10 millions d'euros. On considère que cet investissement donnera des infrastructures viables sur 30 ans.

Tableau 2: Capacités et coûts de mise en décharge

Type de décharge	Capacité sur 30 ans (tonnes)	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

5.2. Données concernant la centrale déchets-énergie

L'incinérateur a une capacité annuelle de traitement de déchets de 7.500 tonnes. L'usine a une efficacité thermique de 75 % et l'énergie dégagée dépend de la composition des déchets envoyés à l'incinérateur (voir à ce propos le Tableau 1). L'énergie récupérée est vendue 0,15 € par kwh.

Il y a une réduction de masse pour les déchets incinérés qui dépend également de leur composition (voir également à ce propos le Tableau 1). D'après l'ADEME [6], les frais variables d'incinération sont de 150 € par tonne pour les petites installations de moins de 20.000 tonnes par an (voir Tableau 3). D'après Aube durable [7], le coût fixe de construction d'un nouvel incinérateur est évalué à 78 millions d'euros. Cette installation aura une durée de vie d'approximativement 30 ans.

Tableau 3: Capacité et coûts d'incinération

Incinérateur (petite capacité)	Capacité (tonnes/an)	Frais d'incinération (€/tonne)	Coût fixe de construction (10 ⁶ €)
Incineration	7.500	150	78

5.3. Données concernant la production de déchets

On considère actuellement que 10.000 tonnes de déchets solides sont produites par an pour l'ensemble de la collectivité à laquelle s'intéresse ce mémoire et il y a une croissance annuelle de 1 % de la quantité de déchets à traiter.

5.4. Données concernant le recyclage

Selon Eurostat, le papier recyclable peut être revendu à un prix de 133 € par tonne [8], le plastique a un prix de 335 € par tonne [9], les métaux à un prix de 255 € la tonne et le verre à un prix de 55 € la tonne [10] (voir Tableau 4).

Tableau 4: Prix de revente des matériaux recyclés

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

Si le tri est fait à domicile, seul 36 % des gens acceptent de le faire. L'hypothèse ici est que l'on peut différencier les poubelles des personnes faisant le tri sérieusement et celles de ceux qui n'acceptent pas de le faire.

Pour les personnes qui malheureusement ne trient pas, il est toujours possible d'envoyer ces poubelles-là dans un centre de tri spécialisé. Celui-ci peut traiter jusqu'à 5.000 tonnes de déchets par an. Selon Eco-Emballage [11], le coût de manutention de ces usines s'élève à 300 € par tonne de déchets tandis que le coût de construction est de 2.720.000 € pour une usine de petite capacité (voir Tableau 5). Cette construction aura une durée de vie d'approximativement 30 ans.

Tableau 5: Capacité annuelle et coûts du centre de tri

Centre de tri	Capacité annuelle (tonnes)	Frais de traitement des déchets (€/tonne)	Coût fixe de construction (10 ⁶ €)
Déchets entrant	5.000	300	2,72

6. Objectifs de la modélisation

De la brève introduction de la problématique du traitement des déchets, on peut constater qu'aucune des alternatives n'est tout-à-fait satisfaisante ou suffisante en soi. On en conclut qu'une solution acceptable serait probablement une combinaison de ces alternatives. La décision finale quant à la politique de traitement des déchets d'une commune devrait donc tenir compte de considérations économiques, techniques, environnementales, sociales et de santé publique. Les responsables municipaux qui sont amenés à faire le choix sont, dans ce cas-ci, partagés et 3 scénarios sont envisagés :

- 1) Les uns voudraient minimiser le coût total de la collecte, du transport et du traitement des immondices.
- 2) Les autres voudraient, dans un souci écologique, minimiser la quantité mise en décharge.
- 3) Enfin, un groupe d'élus fait la proposition du compromis consistant à minimiser le coût de traitement des déchets en imposant, pour des raisons écologiques, un maximum de 20 % (en masse) de déchets mis en décharge ainsi qu'un maximum de 10 % (en masse) de déchets enfouis dans la décharge des cendres.

L'objectif de ce mémoire est donc de créer des modèles à l'aide de GAMS qui vont pouvoir apporter des estimations précises concernant la répartition et le coût du traitement des déchets de cette commune (sur une période de 10 années) en fonction des 3 scénarios envisagés. Chaque proposition va être chiffrée et les décideurs auront ainsi toutes les cartes en main pour faire leur choix.

Avant d'obtenir ces précieux résultats, il va falloir formuler mathématiquement le problème et le prochain chapitre sera consacré à cette formulation.

III. Formulation du problème

La formulation du problème va d'abord commencer par une transcription du problème sous forme d'un diagramme de réseau avec ses nœuds et ses arcs. Ensuite, le choix des variables sera réalisé et sera suivi de la définition des contraintes y afférant. Enfin les objectifs seront définis mathématiquement avant de pouvoir passer à l'écriture sur GAMS qui sera le sujet du prochain chapitre.

1. Diagramme de réseau

La première chose à faire lorsqu'il faut réaliser un diagramme de réseau est de repérer l'ensemble des nœuds et des arcs de celui-ci.

Les nœuds représentent les composants du système qui sont : Les déchets produits par la communauté (De), le tri à la source (TS), le tri en usine (TU), la mise en décharge hors cendres (MD), l'incinérateur (In), la mise en décharge des cendres (MDC), l'énergie récoltée grâce à l'incinération (E), le marché du papier (Pa), le marché du plastique (Pl), le marché du verre (Ve) et le marché des métaux (Me). Les nœuds sont donc au nombre de 11 et sont représentés sur le diagramme de réseau ci-après (Figure 4). L'ensemble de nœuds $N = \{De, TS, TU, In, MD, MDC, E, Pa, Pl, Ve, Me\}$.

Les arcs quant à eux représentent le flux allant d'un nœud à l'autre. Comme vous pouvez le constater sur la Figure 4, ils sont au nombre de 19 et représentent le flux de masse des déchets exprimé en tonne/an à l'exception de l'arc allant de l'incinérateur au nœud de l'énergie récoltée qui lui s'exprime en kwh/an. Remarquez qu'ici les arcs sont directionnels ce qui indique la direction du transfert de matière (et d'énergie).

L'ensemble des arcs $A = \{(De,TS), (De,MD), (De,TU), (De,In), (TS,MD), (TS,In), (TS,Pa), (TS,Pl), (TS,Ve), (TS,Me), (TU,MD), (TU,In), (TU,Pa), (TU,Pl), (TU,Ve), (TU,Me), (In,Me), (In,E), (In,MDC)\}$. Le sens qui est donné à l'arc (i, j) est celui qui va de i à j . Sur le diagramme de réseau l'arc prend donc son origine au nœud i et finit au nœud j .

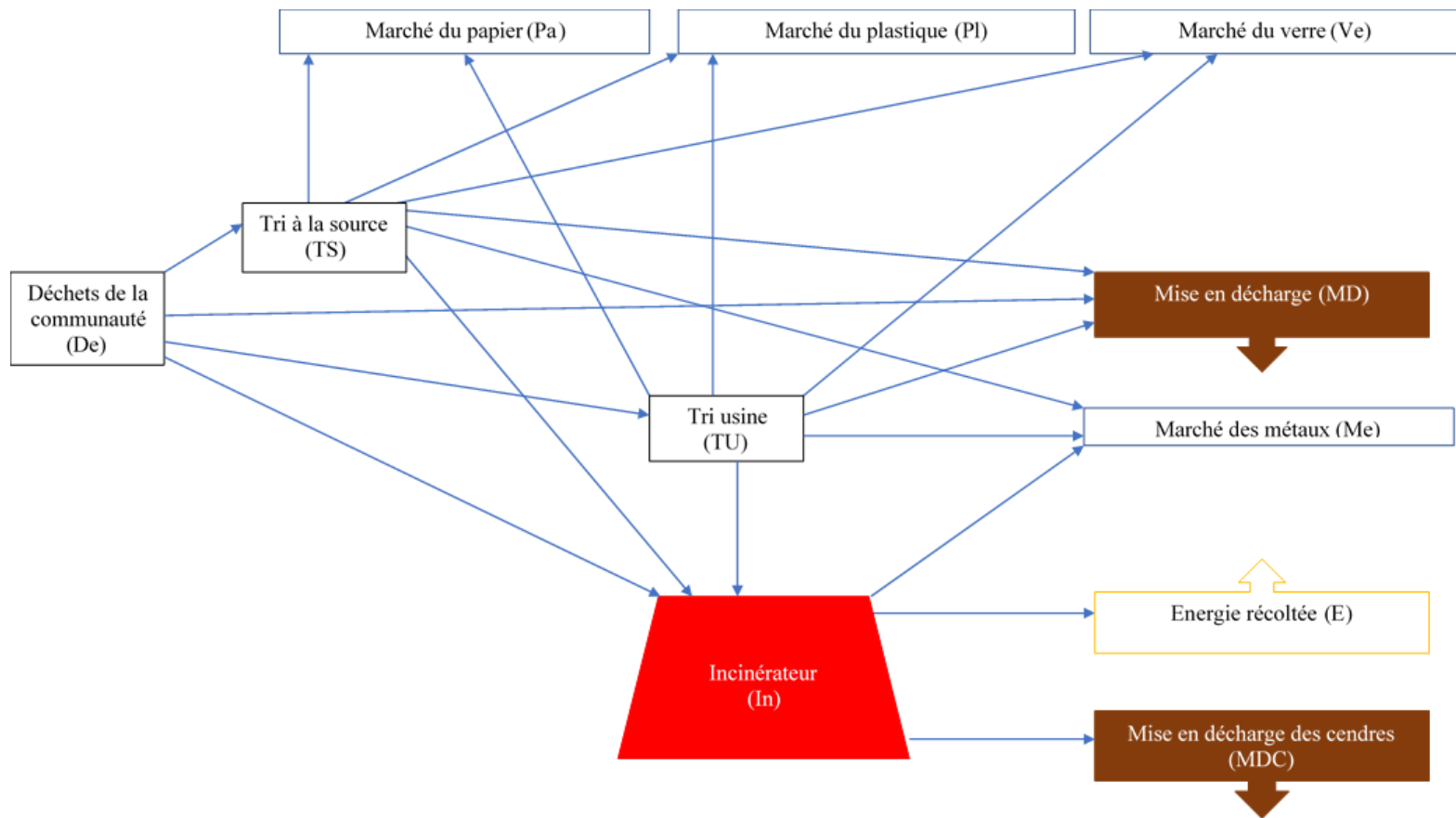


Figure 4: Diagramme de réseau représentant le problème de traitement des déchets

2. Choix des variables de contrôle

Les variables de contrôle sont bien entendu représentées par les arcs sur le diagramme de réseau et il y aura donc 19 variables.

Notons $Q_{IJ}(t)$ [t/an], la quantité de déchets qui traverse l'arc (I,J) à l'année t où I et J représentent les différents nœuds reliés par un arc. Il y a une exception où une des variables : $Q_{InE}(t)$ [kwh/an] représente la quantité d'énergie récupérée à l'incinérateur lors de l'année t .

L'ensemble des variables $V = \{Q_{DeTS}(t); Q_{DeMD}(t); Q_{DeTU}(t); Q_{DeIn}(t); Q_{TSMD}(t); Q_{TSIn}(t); Q_{TSPa}(t); Q_{TSPl}(t); Q_{TSVe}(t); Q_{TSM}(t); Q_{TUMD}(t); Q_{TUI}(t); Q_{TUPa}(t); Q_{TUPI}(t); Q_{TUVe}(t); Q_{TUMe}(t); Q_{InE}(t); Q_{InMDC}(t), Q_{InMe}(t)\}$ avec t allant de 1 à 10.

Maintenant que les variables ont été fixées, les différentes contraintes vont devoir être définies.

3. Définition des contraintes

Les différentes contraintes sont présentées ci-dessous par catégorie avec un indice entre parenthèse représentant le chiffre correspondant à la contrainte.

- La positivité sur tous les flux car un flux de matière ou d'énergie ne peut être négatif :

$$Q_{IJ}(t) \geq 0 \quad (1)$$

- Il n'y a que 36 % des personnes qui trient leurs déchets :

$$Q_{DeTS}(t) = 0,36 * D(t) \quad (2)$$

$D(t)$ est un paramètre représentant la quantité de déchets produite par l'ensemble de la communauté pendant l'année t .

- L'égalité entre les flux entrant et sortant d'un même nœud à l'exception de l'incinérateur où il n'y a pas d'égalité puisque la matière est brûlée :
 - Déchet de la communauté (le flux entrant étant la quantité de déchets produite sur 1 an par la communauté. Celui-ci n'a pas été représenté sur le diagramme de réseau car il est compris dans le nœud) :

$$D(t) = Q_{DeTS}(t) + Q_{DeTU}(t) + Q_{DeIn}(t) + Q_{DeMD}(t) \quad (3)$$

- Tri à la source :

$$Q_{DeTS}(t) = Q_{TSPl}(t) + Q_{TSVe}(t) + Q_{TSMe}(t) + Q_{TSMd}(t) + Q_{TSIn}(t) \quad (4)$$

- Tri en usine :

$$Q_{DeTU}(t) = Q_{TUPa}(t) + Q_{TUPl}(t) + Q_{TUVe}(t) + Q_{TUMe}(t) + Q_{TUIIn}(t) + Q_{TUMd}(t) \quad (5)$$

- Après le tri et grâce à la connaissance de la composition des déchets, la quantité de chaque déchet qui sera recyclée est connue :

- Tri à la source :

$$Q_{TSPl}(t) = 0,25 * Q_{DeTS}(t) \quad (6)$$

$$Q_{TSVe}(t) = 0,11 * Q_{DeTS}(t) \quad (7)$$

$$Q_{TSMe}(t) = 0,13 * Q_{DeTS}(t) \quad (8)$$

$$QTSM_e(t) = 0,04 * QDeTS(t) \quad (9)$$

- Tri en usine :

$$QTUPa(t) = 0,25 * QDeTU(t) \quad (10)$$

$$QTUPl(t) = 0,11 * QDeTU(t) \quad (11)$$

$$QTUVe(t) = 0,13 * QDeTU(t) \quad (12)$$

$$QTUMe(t) = 0,04 * QDeTU(t) \quad (13)$$

- Au niveau de l'incinérateur il ne reste plus que les métaux provenant directement des déchets non triés de la communauté car tous les métaux provenant du centre de tri à la source et en usine ont bien été recyclés. Puisque les métaux sont retirés de l'incinérateur avant brulage à l'aide d'aimants, la relation suivante est obtenue :

$$QInMe(t) = 0,04 * QDeIn(t) \quad (14)$$

- Les différentes contraintes de capacité des nœuds suivants :

- Tri en usine :

$$QDeTU(t) \leq 5.000 \text{ [t/an]} \quad (15)$$

- Mise en décharge hors cendres (les 200.000 tonnes de déchets sont divisées par 3 puisqu'elles représentent la capacité de la décharge sur 30 ans et qu'on réalise la modélisation sur 10 ans) :

$$\sum_{t=1}^{10} [QTSM_D(t) + QDeMD(t) + QTUM_D(t)] \leq 200.000/3 \text{ [t]} \quad (16)$$

- Incinérateur :

$$QDeIn(t) + QTSIn(t) + QTUIn(t) \leq 7.500 \text{ [t/an]} \quad (17)$$

- Mise en décharge des cendres (les 50.000 tonnes de déchets sont divisées par 3 puisqu'elles représentent la capacité de la décharge sur 30 ans et qu'on réalise la modélisation sur 10 ans) :

$$\sum_{t=1}^{10} [QInMDC(t)] \leq 50.000/3 \text{ [t]} \quad (18)$$

- La contrainte suivante est liée à l'énergie récupérée à l'incinérateur :

Celui-ci a une efficacité thermique de 75 % et l'énergie récupérée va dépendre de la valeur calorifique sèche moyenne des déchets s'y trouvant. Deux paramètres doivent donc être ajoutés pour pouvoir calculer l'énergie effectivement récupérée.

La valeur calorifique moyenne des déchets non triés (VCDNT) va pouvoir être calculée grâce aux données provenant du Tableau 1 qui illustre les caractéristiques des déchets. Pour obtenir ce paramètre quelques calculs vont être expliqués ci-après (voir Tableau 6).

Dans un premier temps, pour obtenir l'énergie que représente chaque type de déchet dans ce mélange de déchets humides, il va falloir calculer la masse sèche de chacun de ceux-ci. Afin d'obtenir le poids sec de chaque déchet, il va falloir multiplier son poids mouillé par sa teneur en matière sèche. Ensuite pour obtenir l'énergie que représente chaque déchet, il suffit de multiplier sa valeur calorifique sèche par son poids sec correspondant. Il est maintenant possible de calculer la VCDNT en additionnant les différentes énergies de chaque déchet et en divisant cette somme par le poids mouillé de tous ces déchets réunis.

Finalement, une VCDNT est obtenue en kcal/kg et pour changer ces unités en kwh/t on multiplie par (1/860,421) [kwh/kcal] et par (1/1000) [kg/t] puisque 1 kcal = 860,421 kwh et que 1 t = 1000 kg. Il a été choisi d'exprimer la VCDNT en kwh/t car les données sur la vente d'énergie sont en euro par kwh. Il est actuellement de 0,15 €/kwh.

Tableau 6: Tableau Excel permettant d'obtenir le paramètre VCDNT

Déchets non triés	Poids mouillé (kg)	Teneur en matière sèche (/)	Poids sec (kg)	Valeur calorifique sèche (kcal/kg)	Energie (kcal)
Nourriture	0.29	0.28	0.0812	4713	382.6956
Poussière	0.1	0.97	0.097	2106	204.282
Textiles	0.08	0.9	0.072	4250	306
Papier	0.25	0.9	0.225	4207	946.575
Verre	0.13	1	0.13	0	0
Plastiques	0.11	0.98	0.1078	7982	860.4596
Métaux	0.04	1	0.04	412 (pas en tenir compte car retiré avant incinération)	0
Total	1				
VCDNT (kcal/kg) =	2700.0122	VCDNT (kwh/t) =	3138.012903		

Pour obtenir la valeur calorifique moyenne des déchets triés (VCDT), les mêmes calculs sont appliqués et les valeurs sont détaillées dans le tableau ci-après. Ici le poids mouillé de tous ces déchets réunis est de 0,47 kg. On va donc diviser par 0,47 pour avoir l'énergie contenue dans 1 kg de ce mélange de déchets.

Tableau 7: Tableau Excel permettant d'obtenir le paramètre VCDT

Déchets triés	Poids mouillé (kg)	Teneur en matière sèche (/)	Poids sec (kg)	Valeur calorifique sèche (kcal/kg)	Energie (kcal)
Nourriture	0.29	0.28	0.0812	4713	382.6956
Poussière	0.1	0.97	0.097	2106	204.282
Textiles	0.08	0.9	0.072	4250	306
Total	0.47				
VCDT (kcal/kg) =	1899.95234	VCDT (kwh/t) =	2208.165933		

Maintenant que ces deux paramètres ont été expliqués, la prochaine contrainte peut être présentée :

$$Q_{InE}(t) = 0,75 \cdot (VCDNT \cdot Q_{DeIn}(t) + VCDT \cdot [Q_{TSIn}(t) + Q_{TUIIn}(t)]) \quad (19) \text{ avec :}$$

$$VCDNT = 3138.012903 \text{ [kwh/t]}$$

$$VCDT = 2208.165933 \text{ [kwh/t]}$$

- La contrainte liant la quantité de déchets arrivant à l'incinérateur et la quantité de cendre qu'elle engendrera et qui devra être mise en décharge :

De nouveau pour pouvoir créer la contrainte, des paramètres ont été ajoutés en utilisant encore les données présentes dans le Tableau 1. Ces deux paramètres sont la teneur en cendre moyenne des déchets non triés (TCDNT) et la teneur en cendre moyenne des déchets triés (TCDT). Ils ont été calculés en additionnant le poids des cendres de chaque déchet formé à partir de ce mélange de déchets humides et cette somme a été divisée par la masse humide de ce mélange de déchets (qui est ici égale à 1 kg pour la TCDNT et à 0,47 kg pour la TCDT). On obtient alors un taux de cendre par kg du mélange de déchets (non triés et triés).

Pour obtenir le poids des cendres engendré par chaque déchet il faut multiplier chaque poids mouillé par sa teneur en cendre correspondante. Les valeurs obtenues sont illustrées dans les deux tableaux ci-après.

Tableau 8: Tableau Excel permettant d'obtenir le paramètre TCDNT

Déchets non triés	Poids mouillé (kg)	Teneur en cendre (/)	Poids cendre (kg)
Nourriture	0.29	0.045	0.01305
Poussière	0.1	0.7	0.07
Textiles	0.08	0.022	0.00176
Papier	0.25	0.054	0.0135
Verre	0.13	1	0.13
Plastiques	0.11	0.1	0.011
Métaux	0.04	1	0 (car retiré avant l'incinération)
Total	1		0.23931
TCDNT (/) =	0.23931		

Tableau 9: Tableau Excel permettant d'obtenir le paramètre TCDT

Déchets triés	Poids mouillé (kg)	Cendre (/)	Poids cendre (kg)
Nourriture	0.29	0.045	0.01305
Poussière	0.1	0.7	0.07
Textiles	0.08	0.022	0.00176
Total	0.47		0.08481
TCDT (/) =	0.180446809		

Maintenant que ces deux paramètres ont été expliqués, la contrainte liant la quantité de déchets arrivant à l'incinérateur et la quantité de cendre qu'elle engendrera et qui devra être mise en décharge peut être présentée :

$$Q_{InMDC}(t) = TCDNT * Q_{DeIn}(t) + TCDT * [Q_{TSIn}(t) + Q_{TUIIn}(t)] \quad (20) \text{ avec :}$$

$$TCDNT = 0.23931 \text{ [u.a.]}$$

$$TCDT = 0.180446809 \text{ [u.a.]}$$

- Les deux dernières contraintes ne s'appliquent qu'au troisième modèle et elles seront expliquées dans la section suivante (voir le troisième modèle):

$$Q_{TSMD}(t) + Q_{TUMD}(t) + Q_{DeMD}(t) \leq 0,2 * D(t) \quad (21)$$

$$Q_{InMDC}(t) \leq 0,1 * D(t) \quad (22)$$

4. Définition des objectifs

Comme annoncé précédemment, la modélisation du traitement des déchets correspond à trois modèles différents envisagés par la collectivité locale. L'écriture mathématique de ces trois modèles est représentée ci-dessous. Notez que la résolution des deux premiers modèles tient compte de toutes les contraintes à l'exception de la (21) et (22) qui sont spécifiques au troisième modèle (il est donc le seul à tenir compte de toutes les contraintes démontrées auparavant).

- Le premier modèle a comme objectif est de minimiser le coût total du traitement des déchets :

$$\begin{aligned} \text{Min } C = & \sum_{t=1}^{10} t [52 * (Q_{TSMD}(t) + Q_{TUMD}(t) + Q_{DeMD}(t)) + 300 * Q_{DeTU}(t) + \\ & 150 * (Q_{DeIn}(t) + Q_{TSIn}(t) + Q_{TUIIn}(t)) + 91,35 * Q_{InMDC}(t) - \\ & 0,15 * Q_{InE}(t) - 133 * (Q_{TSPa}(t) + Q_{TUPa}(t)) - 335 * (Q_{TSPl}(t) + \\ & Q_{TUPl}(t)) - 55 * (Q_{TSVe}(t) + Q_{TUVe}(t)) - 255 * (Q_{TSMe}(t) + Q_{TUMe}(t) + \\ & (Q_{InMe}(t)))] \quad (23) \end{aligned}$$

Où C représente le coût variable du traitement des déchets sur 10 ans. En effet, la mise en décharge coûte 52 €/t et son coût est représenté par l'écriture mathématique en brun. Le tri en usine coûte 300 €/t et son coût est représenté par l'écriture en bleue. Pour utiliser l'incinérateur il faut payer 150 €/t et cela est représenté par l'écriture en rouge. Le coût de la mise en décharge des cendres est écrit en noir alors que l'argent récolté grâce à la vente de l'énergie récupérée au niveau de l'incinérateur est en jaune (puisqu'on revend l'énergie à 0,15 €/kwh). L'argent récolté grâce à la vente des déchets recyclable est écrit en vert.

- Le deuxième modèle a comme objectif de minimiser la quantité mise en décharge pour être le plus écologique possible :

$$\text{Min } Q = \sum_{t=1}^{10} [Q_{\text{TSMD}}(t) + Q_{\text{TUMD}}(t) + Q_{\text{DeMD}}(t) + Q_{\text{InMDC}}(t)] \quad (24)$$

Où Q représente la quantité de déchets mis en décharge sur 10 ans. En effet, l'équation de Y somme bien tous les déchets mis en décharge (décharge hors cendre et cendre comprise).

- Le troisième modèle est né d'un compromis entre les deux précédents. Son but est de minimiser le coût de traitement des déchets en imposant, pour des raisons écologiques, de ne pas mettre plus de 20 % (en masse) de déchets en décharge hors cendre (ceci est traduit mathématiquement par la contrainte (21)) et pas plus de 10 % (en masse) de déchets en décharge des cendres (ceci est traduit mathématiquement par la contrainte (22)) :

L'écriture mathématique de cet objectif est la même que celle du premier mais en intégrant les contraintes (21) et (22) au modèle.

Maintenant que la formulation du problème est terminée, il est temps de présenter la structure de l'algorithme sur GAMS, de l'expliquer et de révéler les résultats obtenus.

IV. Structure du problème et algorithme de résolution sur GAMS

Trois problèmes sont à résoudre comme expliqué auparavant. Les problèmes 1 et 3 présentent le même objectif de minimisation des coûts alors que le problème 2 a comme objectif de minimiser la masse des déchets mise en décharge. Il y aura donc deux équations différentes représentant chacune un des deux objectifs.

Les trois problèmes ont exactement les mêmes contraintes à l'exception du problème 3 qui compte deux contraintes supplémentaires, à savoir les contraintes (21) et (22) (Voir Annexe A).

Pour tenir compte de ces différences dans GAMS, il faudra créer un modèle qui prend en compte les contraintes s'appliquant au problème ainsi que l'équation représentant l'objectif recherché. Pour le problème 1, il faut prendre en compte l'équation (23) et les contraintes (1) à (20). Pour le problème 3, il faut ajouter les contraintes (21) et (22) au modèle précédent. Enfin pour le problème 2, il faut prendre en compte l'équation (24) ainsi que les contraintes (1) à (20) (Voir Annexe A).

Ces trois modèles étant des modèles linéaires, c'est le solveur linéaire CPLEX qui est utilisé pour les résoudre.

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau ci-dessous et par la figure ci-après.

Tableau 10: Synthèse des coûts variables, quantités mises en décharge et recyclées des trois alternatives sur 10 ans.

Alternative	Coût variable (10 ⁶ euros)	Quantité mise en décharge (tonnes)	Quantité recyclée (tonnes)
Modèle 1 (économique)	-15,66	30.806	19.962
Modèle 2 (écologique)	+0,7127	11.493	46.462
Modèle 3 (compromis)	-3,6	31.387	32.820

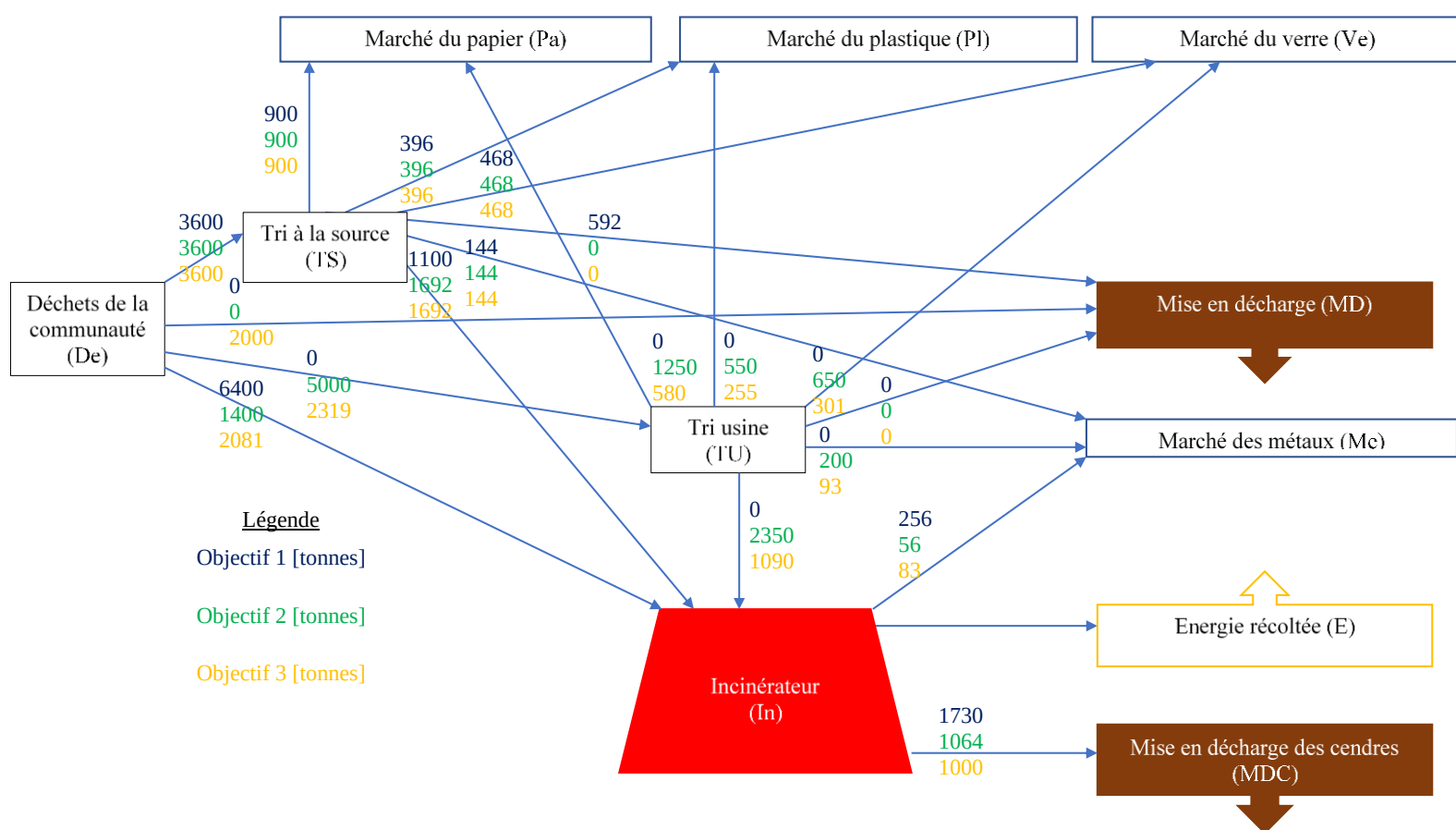


Figure 5: Diagramme de réseau avec les différents flux de la première année de simulation

Ce diagramme de réseau représente les flux de la première année de simulation. Pour connaître les quatre flux au départ de la ville (QDeTS, QDeTU, QDeIn, QDeMD) sur l'ensemble de la simulation, il suffit de se référer aux tableaux ci-après (Tableau 11, 12, 13 et 14).

Tableau 11: Flux de QDeTS par année en fonction du modèle

Alternative	Modèle 1 (tonnes)	Modèle 2 (tonnes)	Modèle 3 (tonnes)
QDeTS(1)	3600.000	3600.000	3600.000
QDeTS(2)	3636.000	3636.000	3636.000
QDeTS(3)	3672.360	3672.360	3672.360
QDeTS(4)	3709.084	3709.084	3709.084
QDeTS(5)	3746.174	3746.174	3746.174
QDeTS(6)	3783.636	3783.636	3783.636

QDeTS(7)	3821.473	3821.473	3821.473
QDeTS(8)	3859.687	3859.687	3859.687
QDeTS(9)	3898.284	3898.284	3898.284
QDeTS(10)	3937.267	3937.267	3937.267

Tableau 12: Flux de QDeTU par année en fonction du modèle

Alternative	Modèle 1 (tonnes)	Modèle 2 (tonnes)	Modèle 3 (tonnes)
QDeTU(1)	0	5000	2318.964
QDeTU(2)	0	5000	2342.154
QDeTU(3)	0	5000	2365.576
QDeTU(4)	0	5000	2389.231
QDeTU(5)	0	5000	2413.124
QDeTU(6)	0	5000	2437.255
QDeTU(7)	0	5000	2461.627
QDeTU(8)	0	5000	2486.244
QDeTU(9)	0	5000	2511.106
QDeTU(10)	0	5000	2536.217

Tableau 13: Flux de QDeIn par année en fonction du modèle

Alternative	Modèle 1 (tonnes)	Modèle 2 (tonnes)	Modèle 3 (tonnes)
QDeIn(1)	6400.000	1400.000	2081.036
QDeIn(2)	6464.000	1464.000	2101.846
QDeIn(3)	6528.640	1528.640	2122.864
QDeIn(4)	6593.926	1593.926	2144.093

QDeIn(5)	6659.866	1659.866	2165.534
QDeIn(6)	6726.464	1726.464	2187.189
QDeIn(7)	6793.729	1793.729	2209.061
QDeIn(8)	6861.666	1861.666	2231.152
QDeIn(9)	6930.283	1930.283	2253.463
QDeIn(10)	6999.586	1999.586	2275.998

Tableau 14: Flux de QDeMD par année en fonction du modèle

Alternative	Modèle 1 (tonnes)	Modèle 2 (tonnes)	Modèle 3 (tonnes)
QDeMD(1)	0	0	2000.000
QDeMD(2)	0	0	2020.000
QDeMD(3)	0	0	2040.200
QDeMD(4)	0	0	2060.602
QDeMD(5)	0	0	2081.208
QDeMD(6)	0	0	2102.020
QDeMD(7)	0	0	2123.040
QDeMD(8)	0	0	2144.271
QDeMD(9)	0	0	2165.713
QDeMD(10)	0	0	2187.371

V. Analyse des résultats

Les résultats obtenus grâce aux modèles vont être discutés ici puis une analyse de sensibilité des diverses contraintes aura lieu dans le chapitre suivant.

Il convient dans un premier temps de calculer les coûts fixes relatifs à chaque modèle de tri puisque les coûts obtenus sur GAMS pour chacun des modèles ne tiennent pas compte de ceux-ci. Ces coûts fixes correspondent aux investissements effectués pour la construction des infrastructures nécessaires au traitement des déchets.

Une décharge hors cendre, une décharge de cendres, un incinérateur et un centre de tri coûtent respectivement 38, 10, 78 et 2,72 millions d'euros (voir Tableau 2, 3 et 5). Ces constructions ont une durée de vie d'approximativement 30 ans et ces investissements sont donc répartis sur une période de 30 années. Puisque notre simulation se fait sur une période de 10 années et que l'on néglige l'actualisation vu les très faibles taux d'intérêts actuels, il ne faudra prendre en compte qu'un tiers de ces investissements pour les coûts fixes.

Puisque pour le modèle 1, le centre de tri n'est jamais utilisé (voir Tableau 12), il ne doit pas être construit et ne fait donc pas partie des frais fixes :

$$\text{Coûts fixes (modèle 1)} = \frac{38+10+78}{3} = 42 \text{ millions d'euros}$$

Puisque pour le modèle 2 la décharge hors cendre n'est pas utilisée (voir Figure 5 et Tableau 14), elle ne doit pas être construite et ne fait donc pas partie des frais fixes :

$$\text{Coûts fixes (modèle 2)} = \frac{10+78+2,72}{3} = 30,24 \text{ millions d'euros}$$

Puisque toutes les infrastructures doivent être construites pour le modèle 3 (voir Figure 5), les coûts fixes sont calculés comme suit :

$$\text{Coûts fixes (modèle 3)} = \frac{38+10+78+2,72}{3} = 42,907 \text{ millions d'euros}$$

Tableau 15: Coûts fixes sur une période de 10 ans en fonction du modèle de traitement des déchets

Alternative	Modèle 1	Modèle 2	Modèle 3
Coûts fixes (10 ⁶ €)	42	30,24	42,907

Le premier modèle consiste à minimiser les coûts totaux des traitements des déchets. Pour ce modèle, un gain (hors coûts fixes) d'approximativement 15,66 millions d'euros est simulé. Néanmoins les coûts fixes s'élèvent ici à 42 millions d'euros et donc **ce traitement de déchets (modèle 1) devra être financé par la collectivité locale à hauteur de 26,34 millions d'euros étalés sur 10 ans** (voir Tableau 16).

Le second modèle est, lui, diamétralement opposé au premier puisqu'il a pour but de minimiser la mise en décharge des déchets, qu'importe le coût qu'engendrera cette politique de traitement de déchets. Cela signifie qu'il faudra déboursier approximativement 712,7 milliers d'euros hors coûts fixes. Les coûts fixes s'élevant ici à 30,24 millions d'euros, **ce traitement de déchets (modèle 2) devra être financé par la collectivité locale à hauteur de 30,9527 millions d'euros étalés sur 10 ans** (voir Tableau 16).

Enfin, certains préfèrent envisager un compromis entre les deux propositions précédentes. Celui-ci prend en compte l'aspect financier et écologique puisque cette proposition demande de minimiser le coût total du traitement des déchets mais en assurant une mise en décharge réduite. En effet, un maximum de 10 % (en masse) des déchets produits pourront aller à la décharge des cendres et un maximum de 20 % (en masse) des déchets produits pourront aller à la décharge classique. Chaque année il ne pourra donc pas y avoir plus de 30 % de la masse de déchets produite qui pourront aller en décharge.

La simulation de ce modèle aboutit à un gain d'approximativement 3,60 millions d'euros hors coûts fixes. Avec les 42,907 millions d'euros de coûts fixes, **ce traitement de déchets (modèle 3) devra être financé par la collectivité locale à hauteur de 39,307 millions d'euros étalés sur 10 ans** (voir Tableau 16).

Tableau 16: Coût total du traitement des déchets sur une période de 10 ans en fonction du modèle de traitement des déchets

Alternative	Modèle 1	Modèle 2	Modèle 3
Coût total (10^6 €)	26,34	30,9527	39,307

Pour comprendre d'où proviennent ces différences, il faut analyser le diagramme de réseau avec les données de flux de la première année de simulation (voir Figure 5).

On constate que lorsqu'on veut minimiser les coûts (modèle 1), **il faut envoyer tout ce qui n'est pas recyclé par l'habitant à l'incinérateur**. Lorsque l'on veut minimiser la quantité de déchets mis en décharge (modèle 2), **il faut envoyer le maximum au centre de tri et le reste des déchets non recyclés à l'incinérateur**.

Le compromis (modèle 3) quant à lui est bloqué par la contrainte sur la décharge des cendres qui stipule de ne pas excéder la quantité de déchets produite de plus de 10 % en masse. Il n'est donc pas possible de tout envoyer à l'incinérateur et un maximum de déchets devra être envoyé à la décharge classique pour minimiser l'envoi au centre de tri qui coûte beaucoup plus cher.

Le compromis est alors bloqué par la contrainte sur la décharge classique qui prévoit de ne pas excéder la quantité de déchets produite de plus de 20 % en masse. Le maximum de déchets est donc envoyé à cette décharge alors que le reste doit être envoyé au centre de tri avant d'être redistribué entre les marchés des matériaux recyclables et l'incinérateur. Notez que le contenu des déchets envoyés à l'incinérateur après tri est moins riche en énergie que celui des déchets non triés (car $VCDNT > VCDT$).

En observant le Tableau 10, il est possible de s'étonner qu'en utilisant le compromis plus de déchets finissent à la décharge qu'en voulant minimiser les coûts sans contrainte écologique. Néanmoins l'analyse des flux sur le diagramme de réseau montre que la différence provient de la décharge utilisée, là où le modèle 1 envoie tout à la décharge des cendres, le modèle 3 répartit ses déchets entre les deux décharges. Puisque les déchets brûlés sont beaucoup plus légers que les autres, on comprend pourquoi la masse mise en décharge pour le compromis est légèrement supérieure à celle du modèle 1. Evidemment tout l'intérêt du compromis est que la quantité de déchets recyclés est bien supérieure à celle de la minimisation des coûts sans contrainte écologique.

Toutes ces explications qui s'appliquent à la première année de simulation s'appliquent aussi aux neuf années suivantes et donc à l'ensemble de la simulation sur les dix années. Les tableaux du chapitre précédent chiffrant les quatre flux au départ de la ville (QDeTS, QDeTU, QDeIn, QDeMD) sur l'ensemble de la simulation le prouvent (Tableau 11, 12, 13 et 14).

VI. Analyse de sensibilité du modèle GAMS

Dans ce chapitre, les dernières questions des décideurs à l'égard des modèles avant de faire leur choix définitif vont être passées en revue. Trois questions intéressantes ont été posées par les membres du conseil d'administration de la collectivité locale.

1. Quel est le montant de la taxe immondice nécessaire pour couvrir l'ensemble des frais pour chacune des alternatives ?

Grace au chapitre précédent détaillant les coûts de traitements des déchets en fonction de la politique mise en place, il est assez aisé de répondre à cette question.

Pour le **modèle 1** : le traitement des déchets coûte 26,34 millions d'euros sur 10 ans. Pour trouver la taxe d'immondice, il faut donc diviser ce coût par la quantité totale de déchets produit sur ces 10 ans :

$$\text{Taxe immondice} = \frac{26,34 \cdot 10^6}{\sum_{t=1}^{10} 10000 \cdot 1,01^{(t-1)}} = \frac{26,34 \cdot 10^6}{104622,2154} = 251,76 \text{ €/t}$$

La taxe immondice serait dans ce cas de 0,25 € par kg de déchets.

Pour le **modèle 2** : le traitement des déchets coûte 30,9527 millions d'euros sur 10 ans :

$$\text{Taxe immondice} = \frac{30,9527 \cdot 10^6}{\sum_{t=1}^{10} 10000 \cdot 1,01^{(t-1)}} = 295,85 \text{ €/t}$$

La taxe immondice serait dans ce cas de 0,30 € par kg de déchets.

Pour le **modèle 3** : le traitement des déchets coûte 39,307 millions d'euros sur 10 ans :

$$\text{Taxe immondice} = \frac{39,307 \cdot 10^6}{\sum_{t=1}^{10} 10000 \cdot 1,01^{(t-1)}} = 375,70 \text{ €/t}$$

La taxe immondice serait dans ce cas de 0,38 € par kg de déchets.

Tableau 17: Taxe immondice en fonction du modèle de traitement de déchets

Alternative	Modèle 1	Modèle 2	Modèle 3
Taxe immondice (€/kg)	0,25	0,30	0,38

2. Dans l'option du compromis (modèle 3), si la masse des cendres que l'on peut mettre en décharge passe de 10 % à 15 % moyennant un coût additionnel de traitement des cendres de 100 €/t (le coût de mise en décharge d'une tonne de cendre passe de 91,35 € à 191,31 €), est-ce que la ville va quand même diminuer ses coûts totaux ?

Le prix caché de cette contrainte est de -2365,088 €/année (voir Annexe B), ce qui signifie qu'augmenter cette contrainte d'une unité diminue le coût du traitement des déchets de 23650,88 €.

Il peut donc être intéressant d'augmenter cette contrainte malgré le coût additionnel lié au traitement des cendres pour réduire le coût du traitement des déchets du modèle 3.

Le gain simulé du traitement des déchets avec ces nouvelles conditions est d'approximativement 13,28 millions d'euros hors coûts fixes (voir Annexe B). Le centre de tri n'étant plus utilisé, les coûts fixes s'élèvent à 42 millions (cfr modèle 1) ce qui correspond à **un coût total pour la commune de 28,72 millions d'euros**. Il est clair que ce résultat est beaucoup plus proche du modèle 1 puisque la différence entre les 2 coûts pour la commune n'est plus qu'approximativement de 2,38 millions d'euros. Une augmentation de 5 % de déchets pouvant aller à la décharge des cendres permet de réaliser un gain de coût variable aux alentours de 9,68 millions d'euro. Autrement dit, l'acceptation de 5 % de déchets en plus à la décharge des cendres (correspondant ici à 50 % de déchets en plus) engendre une augmentation de 268,9 % du gain récolté hors coûts fixes (correspondant ici à une diminution de 26,9 % du coût total).

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

Le prix caché de cette contrainte est de 0 € pour les modèles 1 et 3 alors qu'il est de 3660 € pour le modèle 2 (voir Annexe B).

L'augmentation de la capacité du centre de tri n'a pas de sens pour les modèles 1 et 3 puisque la capacité maximale de traitement des déchets n'est pas utilisée.

Pour le modèle 2, la capacité maximale est utilisée mais l'agrandissement du centre de tri aura bien un effet négatif sur le coût total puisqu'il faudra investir dans cet agrandissement sans que celui-ci permette une diminution des coûts variables (il induira même une augmentation vu son prix caché).

L'augmentation de la capacité du centre de tri n'aura donc jamais un effet bénéfique sur le coût total de traitement des déchets.

VII. Conclusion

Le but de ce mémoire est de présenter une simulation des coûts du traitement des déchets en fonction de trois visions différentes concernant la gestion des déchets dans une collectivité locale. La première totalement économique, la seconde totalement écologique et enfin la dernière un compromis entre les facteurs économiques et écologiques.

Ces trois visions ont fait l'objet de trois modèles différents simulés sur une période de 10 ans. Le **modèle économique** (modèle 1) aura un coût total de 26,34 millions d'euros ce qui correspondra à une **taxe immondice de 0,25 €/kg**. Le **modèle écologique** (modèle 2) aura un coût total de 30,9527 millions d'euros ce qui correspondra à une **taxe immondice de 0,30 €/kg** mais il y aura approximativement **2,3 fois plus de déchets recyclés** et approximativement **2,6 fois moins de déchets en décharge** que pour le modèle économique. Le **modèle du compromis** (modèle 3) aura un coût total de 39,307 millions d'euros ce qui correspondra à une **taxe immondice de 0,38 €/kg** avec des **quantités recyclées à mi-chemin entre les deux autres modèles**.

Il a été démontré que pour **minimiser les coûts** (modèle 1), il faut **envoyer tout ce qui n'est pas recyclé par l'habitant à l'incinérateur**. A l'inverse, pour **minimiser la quantité de déchets mis en décharge** (modèle 2), il faut **envoyer le maximum au centre de tri et le reste des déchets non recyclés à l'incinérateur**.

Le compromis (modèle 3) quant à lui est bloqué par la contrainte sur la décharge des cendres et il n'est donc pas possible d'envoyer tout ce qui n'est pas trié à la source à l'incinérateur. Un maximum de déchets (en respectant la contrainte sur cette décharge) devra donc être envoyé à la décharge classique pour minimiser l'envoi au centre de tri qui coûte beaucoup plus cher.

Avec ces données à disposition, les décideurs ont maintenant toutes les cartes en mains pour orienter leur décision en termes de traitement de déchets ménagers.

VIII. Bibliographie

- [1] ADEME, Campagne nationale de caractérisation des ordures ménagères, résultats Année 2007, Juin 2009.
- [2] Véronique REIX, Le prix de la mise en décharge des déchets non dangereux générés par les collectivités en 2005, ADEME, Mars 2006.
- [3] Omni Conseil, Gestion des mâchefers issus des déchets genevois, Rapport version 4.1, Janvier 2018.
- [4] Le Dauphiné, Un avis défavorable pour le centre d'enfouissement des ordures ménagères, journal du 12/02/2018.
- [5] La Dépêche, Le futur centre d'enfouissement s'ouvre aux élus et responsables associatifs, journal du dimanche 13 octobre 2019, Saint Géraud.
- [6] Christine MANCHERON, Enquête sur les prix de l'incinération, Agence de l'environnement et de la Maîtrise de l'énergie, novembre 2011.
- [7] Aube durable, Tout savoir sur le projet d'incinérateur, 28 mars 2018.
- [8] EUROSTAT, Price developments and volume trade of plastic waste EU-28, février 2019.
- [9] EUROSTAT, Price developments and volume trade of paper waste EU-28, février 2019.
- [10] EUROSTAT, Price developments and volume trade of glass waste EU-28, décembre 2019.
- [11] Eco-Emballages, Concevoir, construire et exploiter un centre de tri, Eco-Emballage édition, 2005.

Annexe A : Ecriture du modèle dans GAMS

Dans cette annexe est présentée l'écriture GAMS des 3 modèles. Ce qui suit correspond donc au document .gms de GAMS.

```

set
t l'année en cours /t1*t10/;
parameter
D(t) la quantité de déchet à l'année t /t1 10000,t2 10100,t3 10201,t4 10303.01,
t5 10406.0401,t6 10510.1005,t7 10615.20151,t8 10721.35352,t9 10828.56706,
t10 10936.85273/;
SCALAR
VCDNT Valeur calorifique moyenne des dechets non tries [kwh\t] /3138.012903/
VCDT Valeur calorifique moyenne des dechets tries [kwh\t] /2208.165933/
TCDNT Taux de cendre moyen des dechets non tries [\] /0.23931/
TCDT Taux de cendre moyen des dechets tries [\] /0.180446809/
PPa Prix du papier [€\t] /133/
PPl Prix du plastique [€\t] /335/
VARIABLES
QDeTS Quantite de dechets transportee de De à TS a l annee t [t\an]
QDeMD Quantite de dechets transportee de De à MD a l annee t [t\an]
QDeTU Quantite de dechets transportee de De à TU a l annee t [t\an]
QDeIn Quantite de dechets transportee de De à J a In annee t [t\an]
QTSPa Quantite de dechets transportee de TS à Pa a l annee t [t\an]
QTSP1 Quantite de dechets transportee de TS à Pl a l annee t [t\an]
QTSVe Quantite de dechets transportee de TS à Ve a l annee t [t\an]
QTSMe Quantite de dechets transportee de TS à Me a l annee t [t\an]
QTSIn Quantite de dechets transportee de TS à In a l annee t [t\an]
QTSMD Quantite de dechets transportee de TS à MD a l annee t [t\an]
QTUPa Quantite de dechets transportee de TU à Pa a l annee t [t\an]
QTUP1 Quantite de dechets transportee de TU à Pl a l annee t [t\an]
QTUVe Quantite de dechets transportee de TU à Ve a l annee t [t\an]
QTUMe Quantite de dechets transportee de TU à Me a l annee t [t\an]
QTUIn Quantite de dechets transportee de TU à In a l annee t [t\an]
QTUMD Quantite de dechets transportee de TU à MD a l annee t [t\an]
QInMe Quantite de dechets transportee de In à Me a l annee t [t\an]
QInE Quantite d'énergie récupérée lors de l'incinération a l annee t [kwh\an]
QInMDC Quantite de dechets transportee de In à MDC a l annee t [t\an]
X Cout total du traitement des dechets [€]
Y Quantite de dechets mise en decharge [t];
POSITIVE VARIABLE QDeTS, QDeMD, QDeTU, QDeIn, QTSPa, QTSP1, QTSVe, QTSMe,
QTSIn, QTSMD, QTUPa, QTUP1, QTUVe, QTUMe, QTUIn, QTUMD, QInMe, QInE, QInMDC;

```

Voir à la page suivante la suite de cette écriture.

```

EQUATIONS
COUT definit la fonction objectif 1 et 3
DECHARGE definit la fonction objectif 2
RECYCLAGE definit la quantite recyclée
eq2 contrainte 2
eq3 contrainte 3
eq4 contrainte 4
eq5 contrainte 5
eq6 contrainte 6
eq7 contrainte 7
eq8 contrainte 8
eq9 contrainte 9
eq10 contrainte 10
eq11 contrainte 11
eq12 contrainte 12
eq13 contrainte 13
eq14 contrainte 14
eq15 contrainte 15
eq16 contrainte 16
eq17 contrainte 17
eq18 contrainte 18
eq19 contrainte 19
eq20 contrainte 20
eq21 contrainte 21
eq22 contrainte 22;

COUT.. X =E= SUM(t, 52*(QTSMD(t) + QTUMD(t) + QDeMD(t)) + 300*QDeTU(t)+ 150*(QDeIn(t) + QTSIn(t)
+ QTUIn(t)) + 91.35*QInMDC(t) - 0.15*QInE(t)- PPa*(QTSPa(t) + QTUPa(t)) - PP1*(QTSP1(t) + QTUP1(t))
- PVe*(QTSVe(t) + QTUVe(t)) - PMe*(QTSMe(t) + QTUMe(t) + QInMe(t)));
DECHARGE.. Y =E= sum(t,QTSMD(t) + QTUMD(t) + QDeMD(t) + QInMDC(t));
RECYCLAGE.. Z =E= sum(t,QTSPa(t) + QTSPl(t) + QTSVe(t) + QTSMe(t)+ QTUPa(t) + QTUP1(t) + QTUVe(t) + QTUMe(t));
eq2(t).. QDeTS(t) =E= 0.36*D(t);
eq3(t).. D(t) =E= QDeTS(t) + QDeTU(t) + QDeIn(t) + QDeMD(t);
eq4(t).. QDeTS(t) =E= QTSPa(t) + QTSPl(t) + QTSVe(t) + QTSMe(t) + QTSMD(t) + QTSIn(t);
eq5(t).. QDeTU(t) =E= QTUPa(t) + QTUP1(t) + QTUVe(t) + QTUMe(t) + QTUIn(t) + QTUMD(t);
eq6(t).. QTSPa(t) =E= 0.25*QDeTS(t);
eq7(t).. QTSPl(t) =E= 0.11*QDeTS(t);
eq8(t).. QTSVe(t) =E= 0.13*QDeTS(t);
eq9(t).. QTSMe(t) =E= 0.04*QDeTS(t);
eq10(t).. QTUPa(t) =E= 0.25*QDeTU(t);
eq11(t).. QTUP1(t) =E= 0.11*QDeTU(t);
eq12(t).. QTUVe(t) =E= 0.13*QDeTU(t);
eq13(t).. QTUMe(t) =E= 0.04*QDeTU(t);
eq14(t).. QInMe(t) =E= 0.04*QDeIn(t);
eq15(t).. QDeTU(t) =L= 5000;
eq16.. sum(t, QTSMD(t) + QDeMD(t) + QTUMD(t)) =L= (200000/3);
eq17(t).. QDeIn(t) + QTSIn(t) + QTUIn(t) =L= 7500;
eq18.. sum(t, QInMDC(t)) =L= (50000/3);
eq19(t).. QInE(t) =E= 0.75*(VCDNT*QDeIn(t) + VCDT*[QTSIn(t)+QTUIN(t)]);
eq20(t).. QInMDC(t) =E= TCDNT*QDeIn(t) + TCDT*[QTSIn(t)+QTUIN(t)];
eq21(t).. QTSMD(t) + QTUMD(t) + QDeMD(t) =L= 0.2*D(t);
eq22(t).. QInMDC(t) =L= 0.1*D(t);

MODEL OBJECTIF1 /COUT, DECHARGE, RECYCLAGE, eq2, eq3, eq4, eq5, eq6, eq7, eq8, eq9, eq10, eq11, eq12, eq13, eq14,
eq15, eq16, eq17, eq18, eq19, eq20/;
MODEL OBJECTIF2 /COUT, DECHARGE, RECYCLAGE, eq2, eq3, eq4, eq5, eq6, eq7, eq8, eq9, eq10, eq11, eq12, eq13, eq14,
eq15, eq16, eq17, eq18, eq19, eq20/;
MODEL OBJECTIF3 /COUT, DECHARGE, RECYCLAGE, eq2, eq3, eq4, eq5, eq6, eq7, eq8, eq9, eq10, eq11, eq12, eq13, eq14,
eq15, eq16, eq17, eq18, eq19, eq20, eq21, eq22/;
SOLVE OBJECTIF1 USING LP MINIMIZING X;
SOLVE OBJECTIF2 USING LP MINIMIZING Y;
SOLVE OBJECTIF3 USING LP MINIMIZING X;

```

Annexe B : Résultats donnés par GAMS

Les résumés des résultats obtenus sur GAMS sont présentés ci-dessous.

```

              S O L V E      S U M M A R Y

MODEL  OBJECTIF1      OBJECTIVE  X
TYPE   LP              DIRECTION MINIMIZE
SOLVER CPLEX          FROM LINE  94

**** SOLVER STATUS      1 Normal Completion
**** MODEL STATUS      1 Optimal
**** OBJECTIVE VALUE    -15663880.1964

```

Figure 6: Coût variable du modèle 1

```

              S O L V E      S U M M A R Y

MODEL  OBJECTIF2      OBJECTIVE  Y
TYPE   LP              DIRECTION MINIMIZE
SOLVER CPLEX          FROM LINE  95

**** SOLVER STATUS      1 Normal Completion
**** MODEL STATUS      1 Optimal
**** OBJECTIVE VALUE    11493.0382

```

Figure 7: Quantité de déchets mis en décharge pour le modèle 2

```

              S O L V E      S U M M A R Y

MODEL  OBJECTIF3      OBJECTIVE  X
TYPE   LP              DIRECTION MINIMIZE
SOLVER CPLEX          FROM LINE  96

**** SOLVER STATUS      1 Normal Completion
**** MODEL STATUS      1 Optimal
**** OBJECTIVE VALUE    -3600027.9429

```

Figure 8: Coût variable du modèle 3

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
t1	-INF	1000.000	1000.000	-2365.088
t2	-INF	1010.000	1010.000	-2365.088
t3	-INF	1020.100	1020.100	-2365.088
t4	-INF	1030.301	1030.301	-2365.088
t5	-INF	1040.604	1040.604	-2365.088
t6	-INF	1051.010	1051.010	-2365.088
t7	-INF	1061.520	1061.520	-2365.088
t8	-INF	1072.135	1072.135	-2365.088
t9	-INF	1082.857	1082.857	-2365.088
t10	-INF	1093.685	1093.685	-2365.088

Figure 9: Contrainte (22) et son prix caché en fonction des années pour le modèle 3

```

          S O L V E          S U M M A R Y

MODEL   OBJECTIF3          OBJECTIVE   X
TYPE    LP                DIRECTION   MINIMIZE
SOLVER  CPLEX              FROM LINE   99

**** SOLVER STATUS      1 Normal Completion
**** MODEL STATUS      1 Optimal
**** OBJECTIVE VALUE    -13281316.9297

```

Figure 10: Coût du modèle 3 suite à l'augmentation de la contrainte (22) de 5 % et à l'augmentation de 100 €/t du traitement des cendres

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
t1	-INF	.	5000.000	.
t2	-INF	.	5000.000	.
t3	-INF	.	5000.000	.
t4	-INF	.	5000.000	.
t5	-INF	.	5000.000	.
t6	-INF	.	5000.000	.
t7	-INF	.	5000.000	.
t8	-INF	.	5000.000	.
t9	-INF	.	5000.000	.
t10	-INF	.	5000.000	.

Figure 11: Contrainte (15) et son prix caché en fonction des années pour le modèle 1

Notez que '.' signifie 0.

```

----- EQU eq15  contrainte 15

```

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
t1	-INF	2318.964	5000.000	.
t2	-INF	2342.154	5000.000	.
t3	-INF	2365.576	5000.000	.
t4	-INF	2389.231	5000.000	.
t5	-INF	2413.124	5000.000	.
t6	-INF	2437.255	5000.000	.
t7	-INF	2461.627	5000.000	.
t8	-INF	2486.244	5000.000	.
t9	-INF	2511.106	5000.000	.
t10	-INF	2536.217	5000.000	.

Figure 12: Contrainte (15) et son prix caché en fonction des années pour le modèle 3

```

----- VAR X

```

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
VAR X	-INF	7.1269E+5	+INF	.

X Cout total du traitement des dechets [€]

Figure 13: Coût variable du modèle 2

```

----- VAR X

```

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
VAR X	-INF	7.1635E+5	+INF	.

X Cout total du traitement des dechets [€]

Figure 14: Coût variable du modèle 2 avec augmentation d'une unité de la contrainte (15)

A l'aide des résultats présents aux Figures 13 et 14, il est possible de calculer le prix caché (du coût variable) de la contrainte (15) pour le modèle 2 sur une période de 10 ans :

$$\text{Prix caché contrainte (15) (modèle 2)} = 7,1635 \cdot 10^5 - 7,1269 \cdot 10^5 = 3660 \text{ €}$$

Ce mémoire traite de la gestion des déchets ménagers en France. Cette problématique est devenue préoccupante vu la croissance démographique et l'augmentation du volume de déchets par habitant.

Il n'est plus acceptable d'opter pour une solution du tout à la décharge à cause de la pollution qu'elle entraîne. Des alternatives telles que l'incinération et le recyclage sont envisagées. Ce mémoire vise à trouver la meilleure répartition des déchets entre ces trois méthodes ainsi que leurs coûts en fonction des sensibilités des décideurs qui sont ici soit économiques, écologiques ou un compromis entre les deux.

Après formulation des différents modèles correspondant à ces visions, il faut transcrire ceux-ci sur le programme GAMS dans le but d'obtenir une simulation sur 10 ans.

Cette simulation a révélé des taxes immondiées de 0,25 €/kg pour la vision économique, 0,30 €/kg pour la vision écologique et 0,38 €/kg pour le compromis.

This thesis deals with the management of household waste in France. This problem has become worrying given the demographic growth and the increase in the volume of waste per inhabitant.

It is no longer acceptable to only opt for a landfill solution because of the pollution it causes. Alternatives such as incineration and recycling are being considered. The goal of this thesis aims to find the best distribution of waste between these three methods and their costs according to the vision of decision makers who are here either economic, ecological or a compromise between the two.

After formulating the different models corresponding to these visions, they must be transcribed on the GAMS program to simulate results over 10 years.

This simulation gave waste removal taxes of 0.25 €/kg for the economic vision, 0.30 €/kg for the ecological vision and 0.38 €/kg for the compromise.

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