

Louvain School of Management

Optimisation du traitement des déchets ménagers

Auteur-e(s) : Laurent DELEU
Promoteur-riche(s) : Daniel DE WOLF
Année académique 2020-2021
Travail de fin d'études (TFE) en vue d'obtenir le titre de
Master (60) en Sciences de Gestion
Horaire de jour

Résumé

Ce travail concerne l'optimisation d'un problème de gestion des déchets dans laquelle plusieurs alternatives de revalorisation des déchets sont proposées et en ne considérant pas que des critères de minimisation du coût total. L'usage de certaines hypothèses permet d'obtenir une formulation linéaire du problème. Les résultats de simulations GAMS sont alors comparés entre les différentes alternatives d'objectif. Certaines améliorations sont ensuite apportées afin de se rapprocher de la réalité. Plusieurs analyses de sensibilité sont réalisées sur le même temps afin d'explorer les limites du modèle. Il apparaîtra entre autre que la valorisation énergétique est la filière plus souvent privilégiée et que certains objectifs apportent plus de robustesse au modèle que d'autres.

Avant-propos

Je souhaite ici remercier mon promoteur Daniel de Wolf de m'avoir permis de choisir ce sujet que j'ai beaucoup aimé traiter. Un grand merci aussi à ma mère qui a corrigé l'orthographe de ce travail. Je suis aussi reconnaissant envers les sociétés propriétaire des logiciels GAMS et Matlab de me permettre d'utiliser et prolonger (respectivement) leur version étudiante. Enfin je remercie l'unité de bio-méthanisation de Tenneville que j'ai eu l'occasion de visiter en 2014 et qui m'a inspiré pour l'une des extensions ce travail.

Table des matières

Résumé	i
Avant-propos	ii
Table des matières	iii
Table des figures	iv
Introduction	1
1 Formulation du problème	2
1.1 Description du modèle	2
1.2 Formulation du problème	3
2 Implémentation dans GAMS	6
2.1 Données numériques	6
2.2 Implémentation du code d'optimisation	7
3 Analyse des résultats	9
3.1 Regard sur les macro-variables	9
3.2 Analyse économique	10
3.3 Recherche du flot maximum	12
4 Considérations supplémentaires	17
4.1 Modèle non-linéaire	17
4.2 Recyclage de la fraction bio-dégradable	17
4.3 Réduction de la quantité de déchets à la source	20
4.4 Analyse de sensibilité plus avancée	22
Conclusion	24
Bibliographie	24
ANNEXES	27

Table des figures

1.1	Diagramme de réseau du modèle	3
3.1	Distribution des déchets non-recyclés en sortie de centre de tri pour le cas 1	9
3.2	Comparaison de la distribution des flux entre les trois alternatives	10
3.3	Distribution des flux en sortie de domicile	10
3.4	Occupation des différents sites	11
3.5	Décomposition des coûts	11
3.6	Distribution des flux en sortie de domicile pour le nouveau compromis	12
3.7	Attribution des lettres aux noeuds du graphes	13
3.8	Structure de graphe pour chaque composant pris séparément	13
3.9	Application de l'algorithme de Ford et Fulkerson au composant "Autre" dans l'alternative de coût total minimum	15
4.1	Résultats trouvés avec ajout de la filière de valorisation des bio-déchets.	18
4.2	Distribution des flux en sortie de domicile avec recyclage des déchets biodégradables	19
4.3	Occupation des différents sites avec recyclage des déchets biodégradables	19
4.4	Évolution du coût total et du flux mis en décharge en fonction de la variation du flux rentrant	20
4.5	Distribution à la source en fonction de la variation de flux rentrant	21
4.6	Évolution des capacité avec la variation du flux rentrant	21
4.7	Évolution du coût total en fonction de la variation de production de déchets (ΔQ) et de la variation de prix de l'énergie (ΔP)	22
4.8	Couples de variation de production de déchets (ΔQ) et de variation de prix de l'énergie (ΔP) pour lesquels le coût total s'annule	23

Introduction

Si la production de déchets est un phénomène naturel, elle est devenue problématique pendant l'Antiquité lors de la sédentarisation qui voit le regroupement au sein de cités et l'accumulation de détritiques qui n'ont alors plus le temps de se décomposer (Solidarité laïque, 2013). Par nécessité d'hygiène, il faut donc les évacuer ce qui a déjà été fait via la mise en place d'égoûts et de décharges dans le monde romain. La composition des déchets a néanmoins évolué jusqu'à nos jours : "les plastiques, les métaux lourds, les rejets gazeux toxiques et autres pollutions issus de nos activités économiques demandent un traitement beaucoup plus sophistiqué" (Gérard,2015) et donc plus cher. C'est donc la mise en décharge qui a été longtemps favorisée, jusqu'à récemment avec par exemple la mise en place de réglementations en matière de déchets se basant sur l'échelle de Lansink qui établit des priorités dans l'ordre suivant (Gérard,2015) :

1. La récupération
2. Le recyclage
3. La valorisation énergétique
4. L'élimination

Le développement de nouvelles infrastructures en terme de gestion de déchets doit donc désormais impérativement prendre ces nouveaux critères en compte. Les outils décisionnels actuels tels que l'usage de logiciels d'optimisation mathématiques (tels que (Tonneau,2017)) s'orientent malheureusement encore fort sur la minimisation des coûts alors que d'autres objectifs plus durables pourraient être mis en avant, ce qui est le but de cette contribution.

Ce travail propose de développer un modèle à l'échelle d'une collectivité telle qu'il en existe en Belgique sous la forme inter-communale. Le modèle se devra d'être réaliste lors de son choix des différentes alternatives de traitement, en prenant notamment en compte les contraintes associées aux infrastructures correspondantes. Une première étape consistera en la formulation mathématique du problème avant d'ensuite implémenter les équations qui en résultent sur GAMS, un logiciel d'optimisation. Des simulations seront alors menées à bien pour différents cas de figures en fonction du critère mis en avant. Les résultats du code de base seront alors comparés et discutés. Finalement, certaines améliorations et analyses supplémentaires seront apportées dans le dernier chapitre.

Chapitre 1

Formulation du problème

La définition du problème de base et sa formulation mathématique sont introduites dans ce chapitre. Aucune valeur numérique n'est encore attribuée aux paramètres afin de préserver la généralité du modèle.

1.1 Description du modèle

Comme vu en introduction, la gestion de déchets se repose sur un portefeuille de traitements qui peuvent leur être appliqués, permettant de plus ou moins les valoriser :

- Le recyclage de certaines matières présentes dans ceux-ci, à savoir le papier, le verre, les plastiques et les métaux. Ces derniers peuvent alors être revendus afin d'être réutilisées. Le recyclage nécessite néanmoins un triage au préalable, effectué soit en centre de tri ou directement au domicile des particuliers ou en entreprise.
- L'incinération qui permet à la fois une valorisation énergétique des déchets et la réduction en volume de ceux-ci. La chaleur est directement utilisée par une centrale électrique à vapeur (ou à cycles combinés). Les cendres qui en résultent ne peuvent cependant plus être recyclées et sont donc directement envoyées dans une décharge dédiée. Il est à noter que les métaux doivent être retirés au préalable, ce qui est effectué à l'aide d'aimants.
- La mise en décharge, généralement peu coûteuse, mais éthiquement de plus en plus remise en question. On y ajoute aussi ce qui reste du tri et qui n'est pas valorisable.

Le diagramme de réseau de la figure 1.1 illustre l'agencement entre les différents traitements à l'échelle d'une collectivité. La composition des flux variant pour chaque couple de noeuds (directionnels ici), il a été jugé bon d'attribuer un arc à chaque composant potentiellement présent sur ces flux. Il y a donc bien 30 arcs pour 5 noeuds. Le modèle utilisé devra choisir quels chemins privilégier pour optimiser l'objectif. Afin d'éviter des solutions simplistes telle que le recyclage de toutes les matières recyclables et la valorisation énergétique du reste, certaines contraintes sont à prendre en compte telles que les capacités des différentes infrastructures mais aussi la propension de la population effectuant le tri à la source. Certaines hypothèses ont ici été faites afin de simplifier le modèle :

- La fraction de population effectuant le tri est fixe, ce qui permet d'obtenir un modèle linéaire.

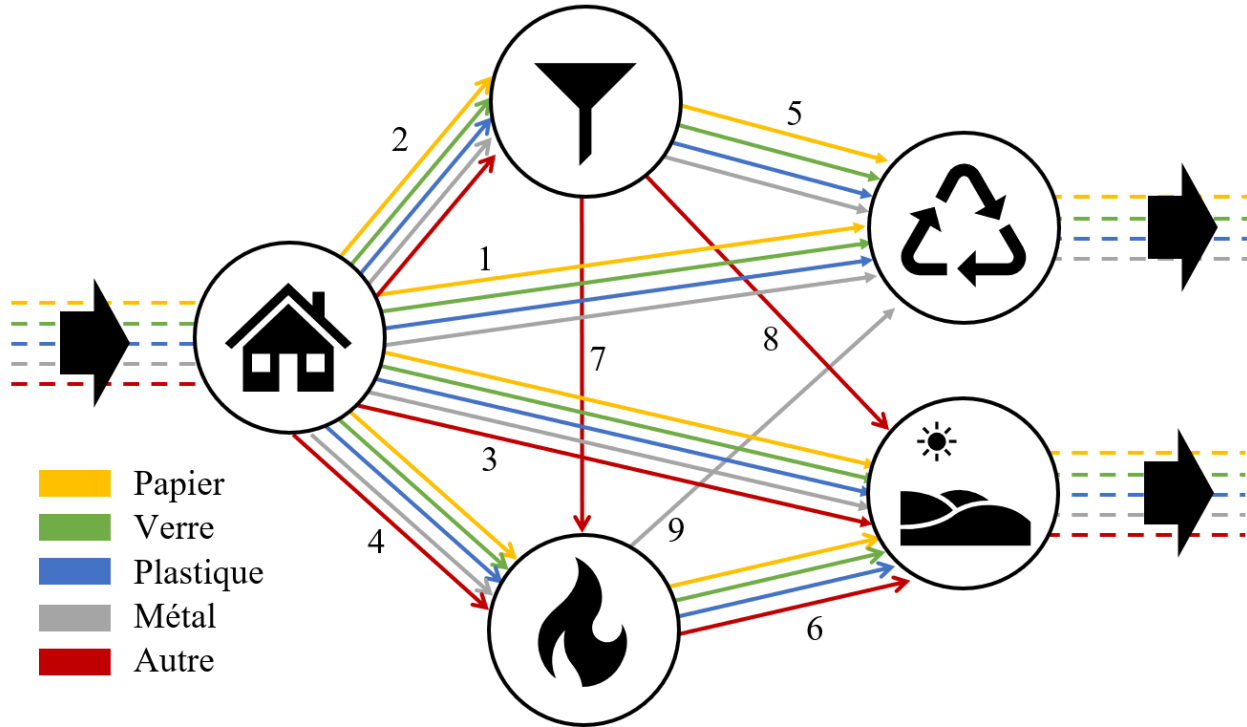


FIGURE 1.1: Diagramme de réseau du modèle

- Le centre de tri et la zone de recyclage sont considérés ici comme deux installations (et donc deux noeuds) différentes même si cela peut ne pas être le cas dans la réalité.
- Toutes les matières recyclées et tous les déchets et cendres mis en décharge convergent vers deux noeuds dédiés, respectivement. Cela n'affecte pas les décisions et permet plus de compacité dans les expressions mathématiques et le code d'optimisation.

Enfin, la quantité à optimiser doit encore être explicitée. Trois alternatives sont ici considérées. La première consiste à minimiser le coût total du réseau alors que la deuxième veut minimiser la quantité totale mise en décharge. Si ces deux propositions ont chacune des défauts, un compromis correspondant à la troisième alternative pourrait satisfaire le plus grand nombre. Il consiste à minimiser à nouveau le coût total mais cette fois-ci sous la contrainte que la quantité mise en décharge ne dépasse pas une certaine proportion : 20% et 10% de la quantité totale produite pour les déchets non-traités et les cendres respectivement.

1.2 Formulation du problème

Ensembles : Il peut s'avérer utile de commencer par en définir certains :

- $B = \{1, 2, 3, \dots, 9\}$ l'ensemble des "macro-branches" (voir figure 1.1).
- $A_i \quad \forall i \in B$ l'ensemble des arcs présents sur la branche i
- $A = \bigcup_i A_i, \quad \forall i \in B$ l'union de tous les arcs, de cardinal 30.

Paramètres : Les paramètres utilisés dans le modèle sont les suivants :

- Q : un scalaire représentant la quantité de déchets entrant à la source, d'unité [t/an]

- w : un scalaire représentant la fraction de recyclage direct (%)
- $\kappa_{\text{Incinerateur}}$: un scalaire représentant la capacité de l'incinérateur, d'unité [t/an]
- κ_{Tri} : un scalaire représentant la capacité du centre de tri, d'unité [t/an]
- κ_{DechNT} : un scalaire représentant la capacité de la décharge sans traitement des déchets au préalable d'unité [t/an]
- κ_{Cendre} : un scalaire représentant la capacité de la décharge de cendres, d'unité [t/an]
- y_0 : le vecteur (1x5) de composition du flux entrant à la source, d'unité (%)
- y_2 : le vecteur (1x5) de composition des déchets qui ne sont pas directement recyclés, d'unité (%) et qui peut être calculé pour ses 4 premières valeurs via l'expression suivante :

$$y_{2,j} = \frac{1-w}{1-0,53w} y_{0,j}$$

- y_{Cendre} : le vecteur (1x5) de transformation des flux à l'incinérateur, d'unité (%)
- C : la matrice (9x5) des coûts d'unité [€/t]

Variables : Il existe une infinité de choix de variables décisionnelles possibles, leur nombre total influençant alors le nombre de contraintes qui les relie. Ici, la décision est prise de considérer chacun des 30 flux partiels comme une variable, ce qui impliquera l'usage de 27 contraintes indépendantes. En effet, les réels choix du modèle peuvent être réduits à seulement 3 degrés de libertés (ddl), c'est à dire la répartition des déchets à la source (2 ddl, le recyclage direct étant fixé) et la répartition des restes en sortie de tri (1 ddl). Ces 3 "macro-variables" trouveront leur intérêt lors du post-processing des résultats et se définissent comme :

$$X_{\text{tri}} = \frac{\sum_{j \in A_2} f_{2,j}}{Q}, \quad X_{\text{incinération}} = \frac{\sum_{j \in A_4} f_{4,j}}{Q}, \quad X_{\text{post-tri}} = \frac{f_{7,5}}{f_{2,5}},$$

où $f_{i,j}$ est la dénomination choisie pour les variables décisionnelles. Il est à noter que l'une des deux première macro-variables pourrait très bien être remplacée par $X_{\text{décharge}} = \sum_{j \in A_3} f_{j,5} / Q$.

Contraintes : Celles-ci peuvent être de natures différentes. Les premières considérées seront les 27 contraintes d'égalité qui pourraient être qualifiées de "structurantes" car ce sont elles qui établissent un lien entre les 30 flux. Les premières venant à l'esprit sont bien sûr celles correspondant à la conservation des quantités sur les 3 noeuds "internes" ce qui donne au final 15 contraintes :

$$\begin{aligned} \text{Domicile :} \quad & y_{0,j}Q = \sum_{i=1}^4 f_{i,j}, \quad \forall j \in \{1, 2, 3, 4\}, \\ & y_{0,5}Q = \sum_{i=2}^4 f_{i,5}, \\ \text{Tri :} \quad & f_{2,j}Q = f_{5,j}, \quad \forall j \in \{1, 2, 3, 4\}, \\ & f_{2,5}Q = f_{5,5} + f_{8,5}, \\ \text{Incinerateur :} \quad & f_{6,j}Q = y_{\text{Cendre},j} f_{4,j}, \quad \forall j \in \{1, 2, 3, 5\}, \\ & f_{9,4}Q = f_{4,4}. \end{aligned}$$

Les contraintes suivantes permettent, elles, d'avoir des proportions correctes dans les flux. Il n'est pas utile d'écrire de contrainte pour les composants "Autre" car ceux-ci peuvent déjà être déterminés grâce à la connaissance des autres variables sur la même branche. Même chose pour la branche 4 qui peut-être complètement résolue grâce aux contraintes de conservation ci-dessus. Les 12 contraintes d'égalité restantes sont donc :

$$\begin{aligned}
 \text{Branche 1 : } & f_{1,j} = y_{0,j}wQ, \quad \forall j \in A_1, \\
 \text{Branche 2 : } & f_{2,j} = y_{2,j} \sum_{k \in A_2} f_{2,k}, \quad \forall j \in \{1, 2, 3, 4\}, \\
 \text{Branche 3 : } & f_{3,j} = y_{2,j} \sum_{k \in A_3} f_{3,k}, \quad \forall j \in \{1, 2, 3, 4\}.
 \end{aligned}$$

Les contraintes de capacité consistent quant à elles aux inégalités suivantes :

$$\begin{aligned}
 \text{Tri : } & \sum_{j \in A_2} f_{2,j} \leq \kappa_{\text{Tri}}, \\
 \text{Incinérateur : } & \sum_{j \in A_4} f_{4,j} + f_{7,5} \leq \kappa_{\text{Incinérateur}}, \\
 \text{DechNT : } & \sum_{j \in A_3} f_{3,j} + f_{8,5} \leq \kappa_{\text{DechNT}}, \\
 \text{Cendre : } & \sum_{j \in A_6} f_{6,j} \leq \kappa_{\text{Cendre}}.
 \end{aligned}$$

Enfin, la positivité des flux ne doit pas être oubliée afin que le sens de ceux-ci soit respecté. La contrainte s'écrit :

$$f_{i,j} \leq \quad \forall i \in B, \forall j \in A.$$

Objectifs : Les 3 alternatives d'optimisation présentées plus haut sont maintenant écrites en termes mathématiques :

— Minimisation du coût total :

$$\min \sum_{i \in B} \sum_{j \in A_i} C_{i,j} f_{i,j}.$$

— Minimisation de la quantité mise en décharge :

$$\min \sum_{j \in A_3} f_{3,j} + \sum_{j \in A_6} f_{6,j} + f_{8,5}.$$

— Compromis où l'on observe deux contraintes d'inégalité supplémentaires :

$$\begin{aligned}
 \min & \sum_{i \in B} \sum_{j \in A_i} C_{i,j} f_{i,j}, \\
 \text{scq : } & \sum_{j \in A_3} f_{3,j} + f_{8,5} \leq 0, 2Q, \\
 & \sum_{j \in A_6} f_{6,j} \leq 0, 1Q.
 \end{aligned}$$

Chapitre 2

Implémentation dans GAMS

Ce court chapitre permettra au lecteur d’avoir une rapide idée de la façon dont le code GAMS sera organisé. GAMS est un logiciel d’optimisation algébrique développé à partir des années 1970 et qui a longtemps été précurseur dans la combinaison du langage mathématique et de programmation et est encore utilisé de nos jours dans une pluralité de domaines tels que la simulation économique, la planification agricole ou encore dans l’industrie chimique (Gams.com,2021).

2.1 Données numériques

Mais avant d’aller plus loin, les valeurs des paramètres seront ici présentées. Ces dernières sont tirées de l’énoncé de ce travail qui lui-même se base sur plusieurs sources, à commencer par la composition typique des déchets ménagers donnée par (Ademe,2009). Dans le tableau 2.2, celle-ci est donnée ainsi que d’autres paramètres propres à chaque élément. La nourriture, les poussières et les textiles sont ici directement réunis dans une catégorie dénommée ”Autre”. Le taux de cendre correspond à la réduction de masse après incinération. Les valeurs de prix de revente dans le cadre du recyclage viennent, elles, de (EUROSTAT,2019).

	Part (%)	Teneur en eau (%)	Valeur calorifique sèche [kcal/kg]	Cendre (%)	Prix de rachat [€/t]
Papier	25	10	4 207	4,5	133
Verre	13	0	0	100	55
Plastiques	11	2	7982	10	335
Métaux	4	0	412	100	255
Autres	47	46,8	4079,1	18,04	/

TABLE 2.1: Données des différents composants des déchets ménagers

Une seconde gamme de données (tableau ??) apporte des informations sur les différentes installations, plus précisément leur capacité et leur coût variable. Ici, la capacité de chaque décharge, donnée sur 30 ans dans l’énoncé, est ici directement convertie en tonnes par an.

Enfin l’énoncé nous informe que l’énergie est ici vendue à 0.150 €/kWh, que la production de déchets actuelle est de 10.000 tonnes (ce qui indiquerait que la population de la collectivité

Site	Capacité [t/an]	Frais[€/t]	Source
Centre de tri	5000	300	Eco-Emballages,2005
Incinérateur	7500	150	ADEME,2009
Décharge sans traitement	6667	52	Reix,2006
Décharge de cendres	16667	91,35	Omni Conseil,2018

TABLE 2.2: Données des différentes installations

tourne autour des 27.000 habitants) et que 36% des habitants acceptent de procéder à un tri depuis leur domicile.

2.2 Implémentation du code d'optimisation

Il existe plusieurs méthodes différentes mais deux alternatives ont fait l'objet d'hésitations :

- Rassembler les contraintes d'égalité et d'inégalité dans deux matrices de dimensions (27×31) et (4×31) respectivement (pour le premier objectif). Les entrées non-nulles sont donc assignées dans la partie 'paramètres'. La méthode voit son avantage dans le fait de n'écrire que deux contraintes dans une double boucle qui va parcourir ces matrices.
- Garder une partie dédiée aux paramètres compacte et devoir alors écrire chacune des contraintes dans la partie dédiée aux équations.

C'est bien le deuxième algorithme qui a malheureusement dû être choisi, GAMS ne permettant apparemment pas d'écrire une équation au sein d'une boucle. La méthode des matrices sera quand même utilisée dans Matlab pour le code équivalent qui a permis de vérifier tous les résultats de ce travail.

Ensembles et variables : 12 ensembles ont été utilisés même si 9 d'entre eux sont en réalité des sous-ensembles (pour chacune des 9 branches) de l'ensemble des composants d'indice j . Les deux ensembles restants sont d'une part celui des branches d'indice i et d'autre part un ensemble regroupant différents types de données, d'indice k , facilitant le parcours d'un tableau de données.

Concernant les variables, elles sont au nombre de 31, c'est à dire 9 vecteurs (un pour chaque branche) de taille variable (dépendant de la branche) plus la variable d'objectif Z .

Paramètres : Afin d'avoir un code le plus compact possible, l'usage de tableaux a été favorisé. Le premier rassemble les données propres à chaque élément et le second concerne les coûts. Ces derniers ont été directement calculés au préalable même si le calcul aurait pu être implémenté dans le code, notamment pour ceux correspondant à l'incinération dont la valeur est trouvée par l'expression suivante :

$$\text{Cout}_{i,j} = 150 - 1,1622 \cdot \eta \cdot P_{kWh} \cdot (1 - y_{eau,j}) \cdot C_{cal,j} \quad \forall i \in \{4, 7\},$$

où 1,162 est un coefficient de conversion d'unités, $\eta = 0,75$ est le rendement énergétique de

la centrale à vapeur, P_{kWh} est le prix du kWh donné plus haut et $y_{eau,j}$ et $C_{cal,j}$ sont la teneur en eau et le pouvoir calorifique du composé j respectivement.

Chapitre 3

Analyse des résultats

Les résultats de l'optimisation utilisant le code GAMS décrit au chapitre précédent, vont être désormais présentés en comparant à chaque fois les trois alternatives d'objectif de minimisation.

3.1 Regard sur les macro-variables

Les macro-variables introduites précédemment vont nous permettre de synthétiser les données collectées et ainsi ne pas se perdre parmi les 30 flux calculés (visibles à la figure 3.2). L'attention est d'abord portée sur la répartition en sortie du domicile (figure 3.3). Comme attendu, dans tous les cas, la même quantité est directement recyclée. Les autres fractions vont quant à elles très fort varier entre les différents objectifs. Concernant le triage, il est tout simplement absent dans la première alternative, car jugé trop peu rentable. Sa part va alors croître au fur et à mesure que le critère de coût est mis en second plan, à l'inverse de l'incinération qui, elle va être progressivement défavorisée. La mise en décharge est, quant à elle, complètement abandonnée lorsque celle-ci doit être minimisée.

Le choix effectué en sortie du centre de tri est lui plutôt radical : l'incinération des restes sera toujours favorisée sauf si la filière incinérateur et décharge de cendres est déjà saturée, ce qui est uniquement le cas lors de la simple minimisation du coût total. Les 8% de la figure 3.1 représentent donc l'excédent qui ne peut donc qu'aller vers la décharge des déchets non traités. Il est à noter que dans l'alternative de minimisation de la quantité mise décharge, l'incinération après triage est

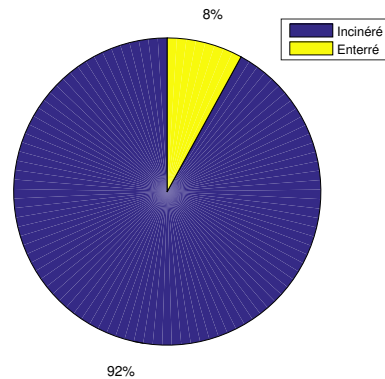


FIGURE 3.1: Distribution des déchets non-recyclés en sortie de centre de tri pour le cas 1

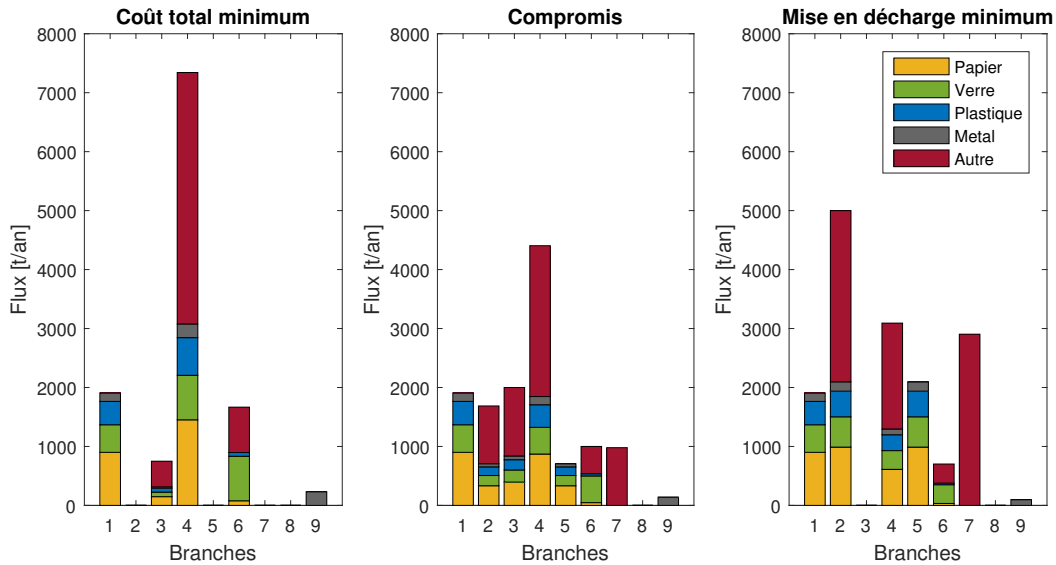


FIGURE 3.2: Comparaison de la distribution des flux entre les trois alternatives

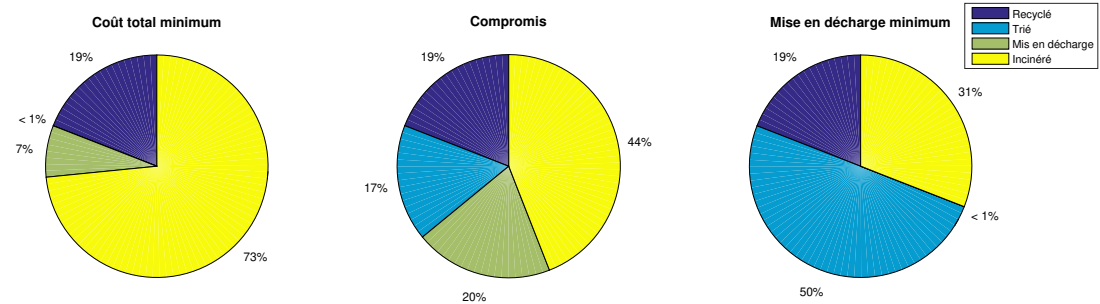


FIGURE 3.3: Distribution des flux en sortie de domicile

favorisée non pas pour sa rentabilité mais pour son avantage de réduction du volume du flux.

Un regard sur l'occupation des sites (figure 3.4) indique que c'est la solution du compromis qui a une utilisation la plus équilibrée des installations, c'est aussi celle qui utilise le plus la mise en décharge sans traitement, son critère concernant la somme des deux décharges. Enfin il apparaît que le réseau est globalement encore loin de la saturation, l'occupation de la décharge sans traitement étant faible dans tous les cas.

3.2 Analyse économique

Les résultats obtenus pour le coût total (tableau 3.1) sont pour le moins surprenants car dans tous les cas négatifs, ce qui correspond à un bénéfice. La mise en place d'une taxe d'immondices n'est dès lors pas d'actualité ici. Une décomposition des coûts est proposée (figure 3.5) afin de mieux identifier la cause de ceci. Il apparaît tout d'abord que ce sont l'incinération et le triage qui créent les plus grandes variations. Concernant la 2ème et 3ème

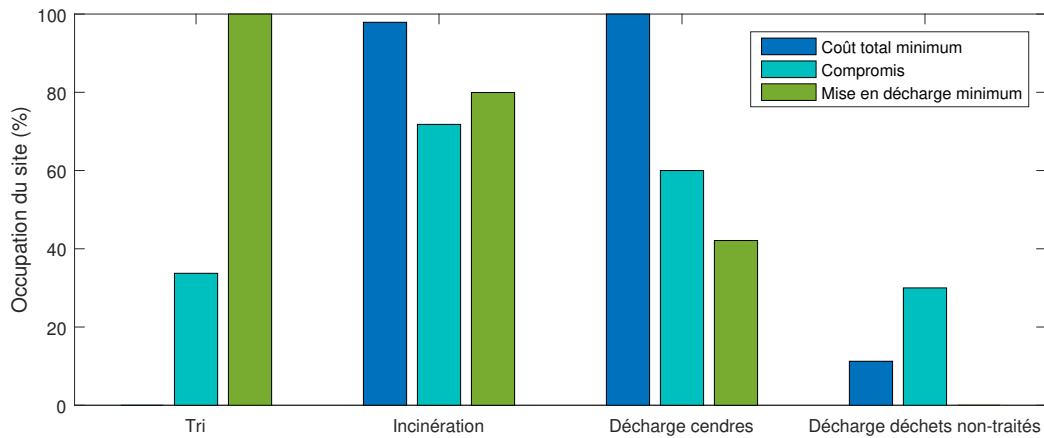


FIGURE 3.4: Occupation des différents sites

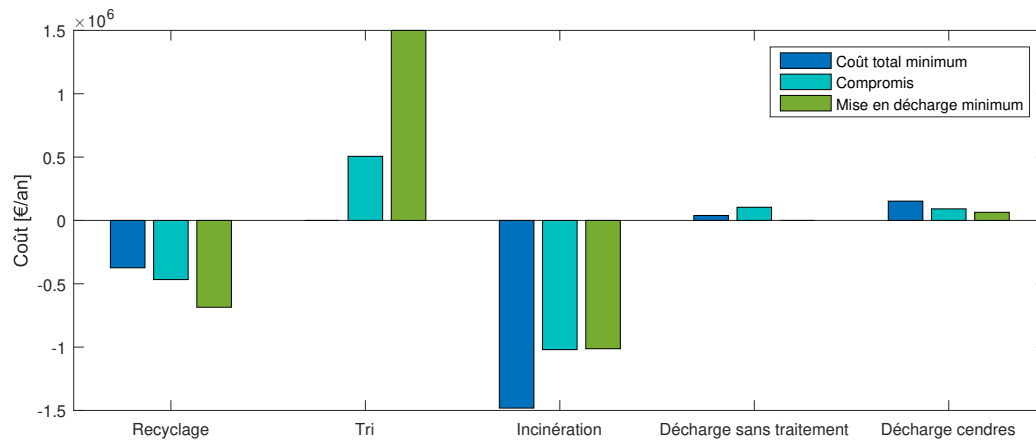


FIGURE 3.5: Décomposition des coûts

alternative, les suppléments de revenus de recyclage grâce au triage sont infimes comparés aux coûts de ce même triage. Ce déséquilibre entre les contributions pourrait indiquer que de faibles variations dans les frais et prix de rachats élevés risquent de faire basculer les décisions du modèle. C'est ce qui va être vérifié ci-dessous via quelques évaluations de sensibilité.

	Cas 1	Cas 2	Cas 3
Coût total [k€/an]	-1.664	-786	-134

TABLE 3.1: Coût total pour les objectifs de coût minimum (cas 1), de compromis (cas 2) et de mise en décharge minimum (cas 3)

Modification d'une contrainte : Si dans le cadre du compromis, il était possible de relâcher une contrainte (passage de 10% à 15% de cendres) avec une augmentation des frais de la décharge concernée (+100€ par tonne) en contrepartie, il serait utile de calculer si cela

apporte un réel avantage économique. Le code est donc exécuté avec les nouvelles valeurs et la réponse est oui : le coût total diminue de $551,5[k/an]$. En effet, si les frais de mise en décharge sont plus que doublés, cela permet dans le même temps d'incinérer une quantité de déchets bien plus importante (facteur $3/2$ si l'on considère les compositions inchangées). Or il a été vu plus haut que les variations de coûts liés aux décharges sont négligeables par rapport aux bénéfices engrangés par l'incinérateur. Des changements sur la répartition à la source sont à noter. L'observation de la figure 3.6 révèle l'abandon complet du triage et une diminution de la mise en décharge sans traitement au profit de l'incinération.

Augmentation d'une capacité : L'analyse robuste du modèle peut aussi concerner des paramètres tels que la capacité du centre de tri pour laquelle l'impact d'une potentielle augmentation va être évalué. Dans ce sens, une méthode pourrait consister à changer directement la valeur de la capacité dans le code. Il est toutefois encore plus simple d'opérer de la façon suivante : en consultant dans le fichier de résultats GAMS (voir Annexe A) le prix caché de la contrainte correspondante, c'est à dire la variation de l'objectif qui correspond à une augmentation d'une unité du membre de droite. Cependant, remarquons que rien ne garantit que l'évolution soit monotone sur cet écart de valeur (il faudrait idéalement calculer la dérivé de façon analytique). En ce qui concerne le résultat trouvé, il n'est non-nul que dans l'alternative de minimisation de mise en décharge et correspond à une augmentation du coût de $319/an$, donc économiquement non-bénéfique. En effet, alors que le centre de tri n'était pas, ou que partiellement, utilisé dans les deux alternatives, la pleine occupation était déjà ici atteinte. L'espace ajouté est donc tout de suite rempli, mais le triage ayant un coût, cela impacte directement le coût total.

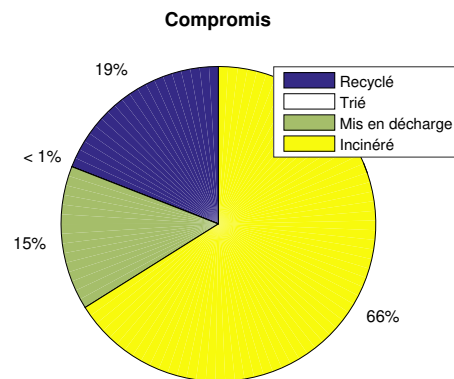


FIGURE 3.6: Distribution des flux en sortie de domicile pour le nouveau compromis

3.3 Recherche du flot maximum

Il est apparu dans les précédents résultats que la capacité des quatre infrastructures 3.4 est loin d'être dépassée pour le flux entrant de 10.000 tonnes par an. Il s'avérera toutefois utile à la section (4.3) d'avoir calculé au préalable le flot maximum de notre modèle. Ce dernier est, pour l'occasion, illustré d'une manière légèrement différente (figure 3.7) : des lettres sont attribuées aux différents noeuds. Un noeud de sortie (G) est aussi ajouté afin de faciliter l'attribution des différentes capacités.

L'algorithme de Ford et Fulkerson, généralement utilisé pour ce genre de problème, n'est malheureusement ici pas directement applicable et ce pour deux raisons principales. La première est la présence d'un chemin (A,C,G) ne rencontrant aucune limitation si ce n'est

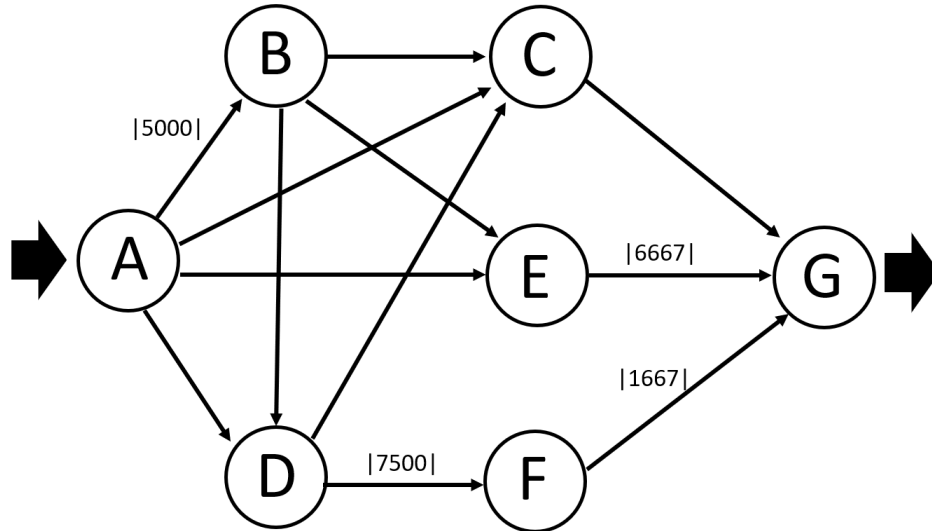


FIGURE 3.7: Attribution des lettres aux noeuds du graphes

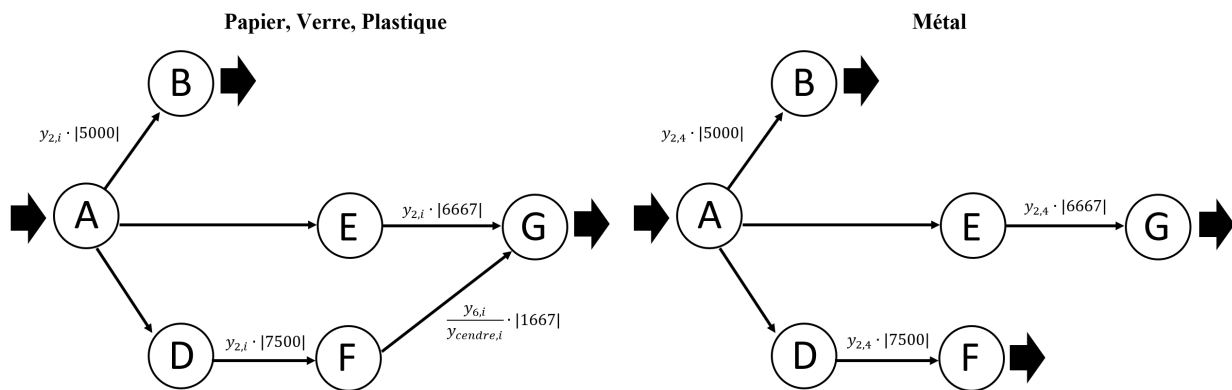


FIGURE 3.8: Structure de graphe pour chaque composant pris séparément

une proportionnalité entre le flux de A à C et le flux entrant, tous deux pouvant quand même tendre vers l'infini. La deuxième problématique concerne le noeud F, c'est à dire la réduction du flux lors de la transformation en cendres. En effet la capacité de la décharge de cendres doit être adaptée à chaque type de déchet. Plus généralement, la présence des flux de différentes natures ne permet pas de pouvoir faire passer, par exemple, l'entièreté du flot par un seul chemin qui ne peut pas accueillir tous les types de déchets.

La méthode utilisée est donc la suivante. Dans un premier temps, le noeud de recyclage (C) est supprimé, ce qui nécessite d'adapter la valeur du flux entrant qui sera réduit de 0,36%. Dans un second temps, un graphe sera considéré par type de déchet pour lesquels la structure varie. La figure 3.8 illustre que les capacités "globales" sont multipliées par les fractions du composant sur les branches concernées (le premier indice correspond au numéro du noeud attribué en figure 1.1). Une hypothèse est donc faite : la composition des différents flux est considérée comme constante par rapport à une évolution de production de déchets.

Algorithme de Ford et Fulkerson : Si le calcul des flots maximum pour chaque type de déchet peut être désormais directement effectué, un exemple d'application de l'algorithme est tout de même proposé¹ pour les déchets "Autre" dont le graphe est illustré en figure 3.9. Soit T l'ensemble des noeuds touchés, E l'ensemble des noeuds examinés et Δf la différence de quantité apportée à un noeud, alors :

- Itération 1 :
 - Initialisation : $T = \{A\}$, $E = \emptyset$, $\Delta f_A = +\infty$
 - Processus de marquage :
 - Examen de A
 - $\Delta f_B = +2904,5$ Label(B) = $(A^+, +2904, 5)$
 - $\Delta f_D = +\infty$ Label(D) = $(A^+, +\infty)$
 - $\Delta f_E = +\infty$ Label(E) = $(A^+, +\infty)$
 - $T = \{A, B, D, E\}$ $E = \{A\}$
 - Examen de E
 - $\Delta f_G = +3872,7$ Label(G) = $(E^+, +3872, 7)$
 - $T = \{A, B, D, E, G\}$ $E = \{A, E\}$
 - Noeud de sortie touché : passage à la mise à jour du flot
 - Mise à jour du flot : +3872,5 le long du chemin A,E,G
- Itération 2
 - Initialisation : $T = \{A\}$, $E = \emptyset$, $\Delta f_A = +\infty$
 - Processus de marquage :
 - Examen de A
 - $\Delta f_B = +2904,5$ Label(B) = $(A^+, +2904, 5)$
 - $\Delta f_D = +\infty$ Label(D) = $(A^+, +\infty)$
 - $\Delta f_E = +\infty$ Label(E) = $(A^+, +\infty)$
 - $T = \{A, B, D, E\}$ $E = \{A\}$
 - Examen de D
 - $\Delta f_F = +4927,5$ Label(F) = $(D^+, +4927, 5)$
 - $T = \{A, B, D, E, F\}$ $E = \{A, D\}$
 - Examen de F
 - $\Delta f_G = +4265,5$ Label(G) = $(F^+, +4265, 5)$
 - $T = \{A, B, D, F, G\}$ $E = \{A, D, F\}$
 - Noeud de sortie touché : passage à la mise à jour du flot
 - Mise à jour du flot : +4265,5 le long du chemin A,D,F,G
- Itération 3
 - Initialisation : $T = \{A\}$, $E = \emptyset$, $\Delta f_A = +\infty$
 - Processus de marquage :
 - Examen de A
 - $\Delta f_B = +2904,5$ Label(B) = $(A^+, +2904, 5)$
 - $\Delta f_D = +\infty$ Label(D) = $(A^+, +\infty)$
 - $\Delta f_E = +\infty$ Label(E) = $(A^+, +\infty)$
 - $T = \{A, B, D, E\}$ $E = \{A\}$
 - Examen de B : $T = \{A, B, D, E\}$ $E = \{A, B\}$

1. Par soucis de lisibilité, aucune unité n'y sera affichée

- Examen de E : $T = \{A, B, D, E\}$ $E = \{A, B, E\}$
 - Examen de D
 - $\Delta f_F = +662$ $\text{Label}(F) = (D^+, +662)$
 - $T = \{A, B, D, E, F\}$ $E = \{A, B, D, E\}$
 - Examen de F : $T = \{A, B, D, E, F\}$ $E = \{A, B, D, E, F\}$
- Critère d'arrêt atteint : tout les noeuds touchés ont été examinés sans atteindre la sortie.
 Flot maximum : 8138, 2

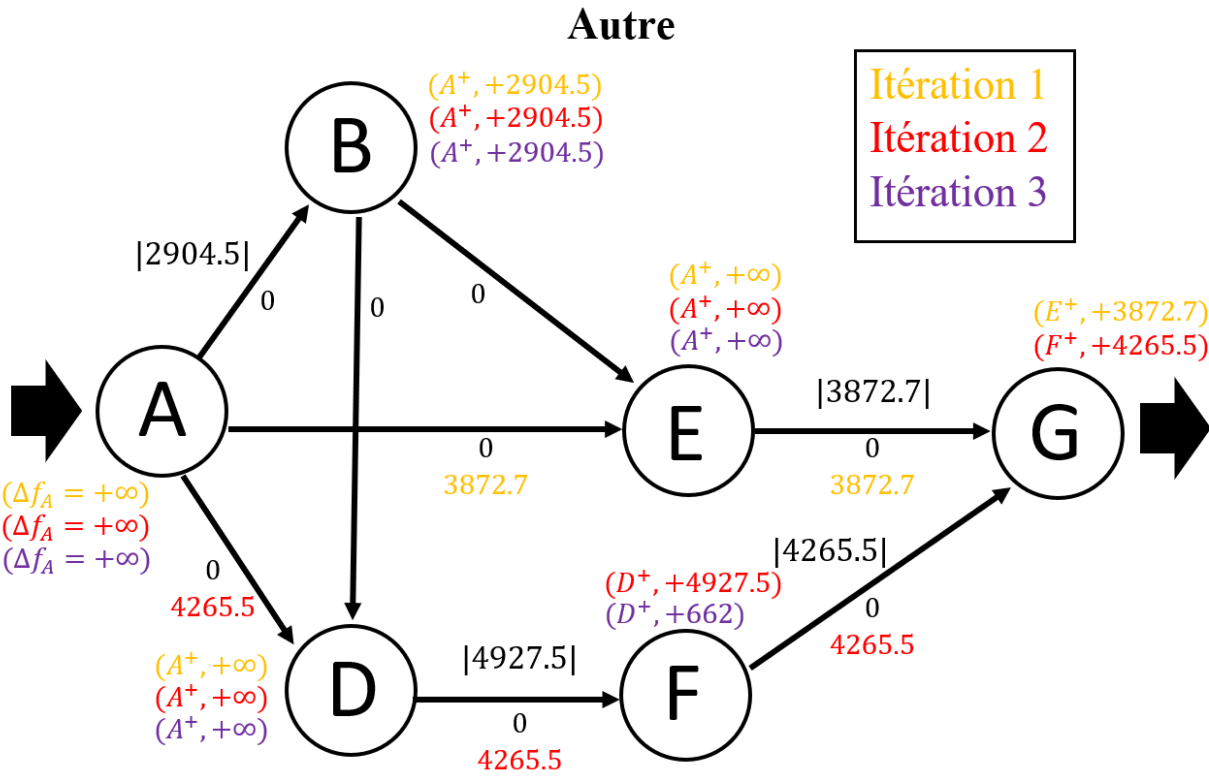


FIGURE 3.9: Application de l'algorithme de Ford et Fulkerson au composant "Autre" dans l'alternative de coût total minimum

Variation selon les objectifs : La méthode proposée ci-dessus correspond aux cas d'alternatives de minimisation du coût et de la quantité mise en décharge. Les valeurs trouvées pour celles-ci sont d'ailleurs égales. Il n'en va pas de même pour le cas de compromis qui ajoute deux contraintes supplémentaires. Par exemple, celle s'adressant à la décharge de cendres vaudra $0,1 \times 0,8092 \times Q_{1,max} = 1611,04[t/an]$, avec $Q_{1,max}$ le flot total du premier objectif. Cette valeur est plus petite et contraignante que la capacité du site : cette dernière est donc remplacée. Il en va de même pour la décharge des déchets non-traités qui voit 6667 remplacé par 3222,07. Il en résulte les valeurs de flot maximum présentes dans le tableau 3.2, comparées aux limites observées lors de l'utilisation du code GAMS. Les erreurs, de l'ordre de 1% peuvent être non seulement expliquées par les arrondis faits à la calculatrice, mais aussi par l'hypothèse de constance des compositions de flux utilisée.

	Cas 1	Cas 2	Cas 3
Q_{max} théorique [t/an]	19.909	15.359	19.911
Q_{max} GAMS [t/an]	20.096	15750	20.096
Erreur (%)	0,93	2,54	0,93

TABLE 3.2: Flots maximum calculés et observés pour les objectifs de coût minimum (cas 1), de compromis (cas 2) et de mise en décharge minimum (cas 3)

Chapitre 4

Considérations supplémentaires

Ce chapitre propose plusieurs extensions, dont deux améliorations apportées au modèle afin de le rendre plus réaliste. La sensibilité sera ensuite reconsidérée.

4.1 Modèle non-linéaire

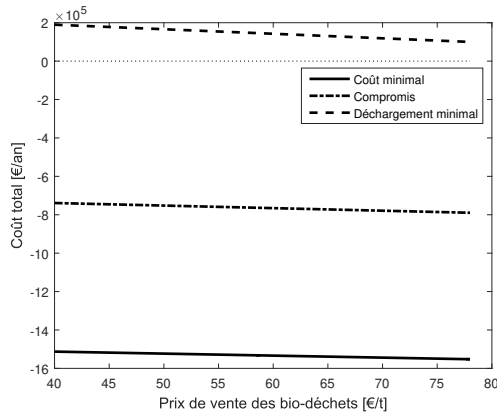
Le premier changement consiste à retirer l’hypothèse de fraction constante de foyers effectuant le tri ($w=36\%$) et de la remplacer par une contrainte de non déplacement de cette valeur. Cette modification n’est pas anodine car elle demande d’ajouter une variable supplémentaire au problème mais elle transforme surtout la nature du problème qui devient non-linéaire. En effet, les contraintes de composition sur la branche 2 et 3 accueillent désormais un produit entre w et les variables des flux concernés. La résolution nécessite dorénavant un solveur dédié (“NLP” dans GAMS). Les résultats sont aussi impactés : la part de tri à la source est par exemple complètement abandonnée dans les deux cas où le coût total est minimisé. D’autres modifications des résultats pourront être observées sur les graphes de la 4.3.

4.2 Recyclage de la fraction bio-dégradable

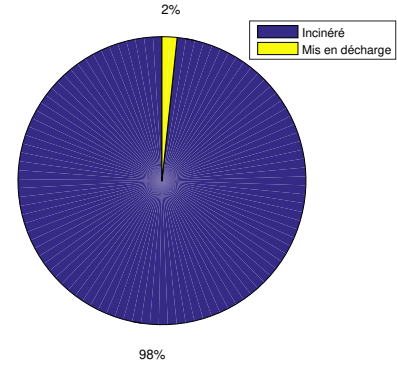
Il a été mentionné dans l’introduction qu’il existe aussi des filières de valorisation des déchets bio-dégradables. Un exemple de processus est la bio-méthanisation qui consiste en la fermentation anaérobie des bio-déchets qui produit certains gaz dont le méthane. Ce biogaz peut être soit directement brûlé, soit épuré pour en faire du bio-méthane (entre 50% et 60%). Le substrat peut quant à lui être composté pour poursuivre une fermentation aérobie afin d’être vendu à terme comme engrais (3,6€/t (GRDF, 2021)). Le calcul du prix de vente du gaz est quant à lui plus compliqué à déterminer. En sachant aussi que :

- La valeur de rachat du bio-gaz en terme de son énergie 0,15 €/kWh de l’énoncé
- $65m^3$ de biogaz sont récupérés par tonne de bio-déchets
- La combustion de $1m^3$ de gaz apporte 11.54 kWh d’énergie
- La quantité de substrat sortant vaut environ 88% de celle d’entrée
- Un site de biométhanisation a des frais de 75 €/t,

il est possible de calculer une estimation du prix qui sera utilisé dans le modèle : 41,12 €/t. Il est néanmoins apparu que des variations sur cette valeur n’affectent pas les décisions du



(a) Évolution du coût total avec le prix de rachat des déchets compostables



(b) Distribution des déchets non-recyclés en sortie de centre de tri pour le cas 1 avec recyclage des déchets biodégradables

FIGURE 4.1: Résultats trouvés avec ajout de la filière de valorisation des bio-déchets.

modèle. La seule quantité qui se voit changée est le coût total illustré à la figure 4.1a.

Avant de poursuivre, il est nécessaire de préciser que le nombre de variables est ici passé de 31 (modèle non linéaire) à 37. Il y a en effet 6 branches sur lesquelles les bio-déchets sont présents. A noter qu'il reste toujours une part de déchets "Autre" comprenant par exemple les textiles et les poussières. Les contraintes qui sont ajoutées ne peuvent quant à elles pas changer le nombre de degré de liberté : il doit y en avoir 6 qui sont les suivantes :

$$\begin{aligned}
 \text{Conservation :} \quad & y_{0,6}Q = \sum_{i=1}^4 f_{i,6}, \\
 & f_{2,6} = f_{5,6}, \\
 & f_{6,6} = y_{\text{Cendre},6}f_{4,6}, \\
 \text{Branche 1 :} \quad & f_{1,6} = y_{0,6}wQ, \\
 \text{Branche 2 :} \quad & f_{2,6} = y_{2,6} \sum_{j \in A_2} f_{2,j}, \\
 \text{Branche 3 :} \quad & f_{3,6} = y_{2,6} \sum_{j \in A_3} f_{3,j}.
 \end{aligned}$$

Les résultats sont maintenant comparés par rapport à ceux du précédent chapitre et il semble y avoir toujours les mêmes tendances. La figure 4.2 indique que la part de recyclage directe est plus importante, ce qui s'explique par la quantité supplémentaire de déchets potentiellement recyclable. Ceci donne donc du répit à l'incinérateur qui voit son occupation (voir figure 4.3 légèrement baisser. Fait surprenant : la part de tri à la source semble être la même dans les trois cas alors que c'est le code non-linéaire qui a ici été utilisé.

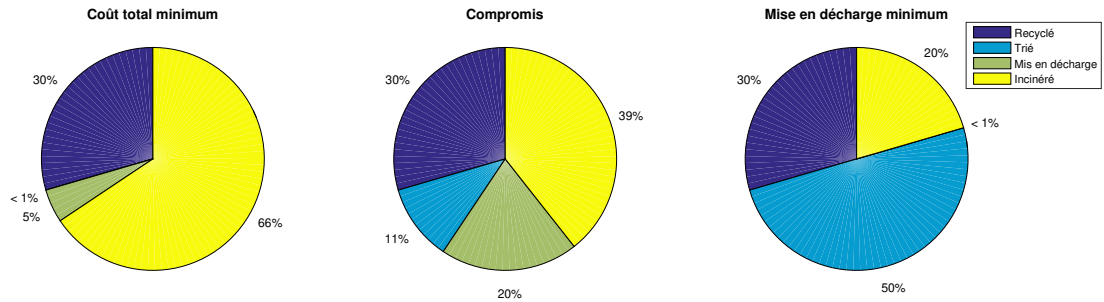


FIGURE 4.2: Distribution des flux en sortie de domicile avec recyclage des déchets biodégradables

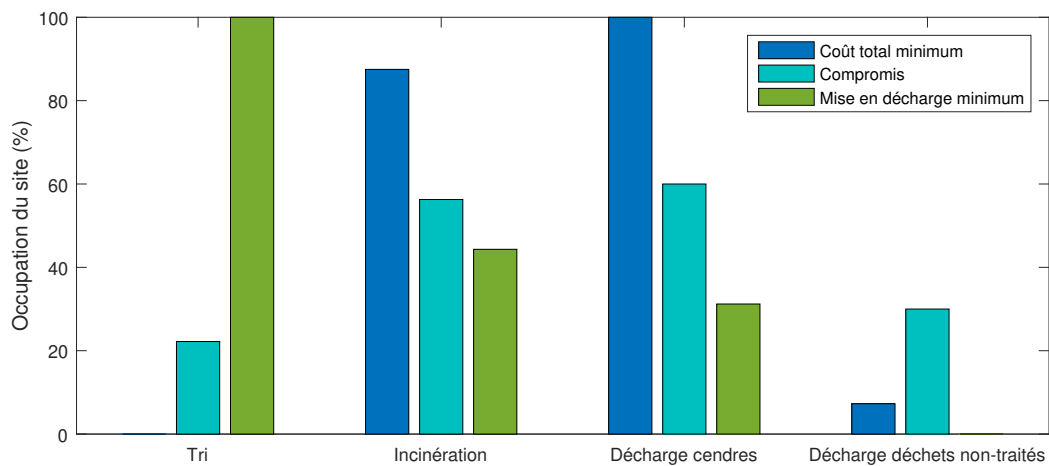


FIGURE 4.3: Occupation des différents sites avec recyclage des déchets biodégradables

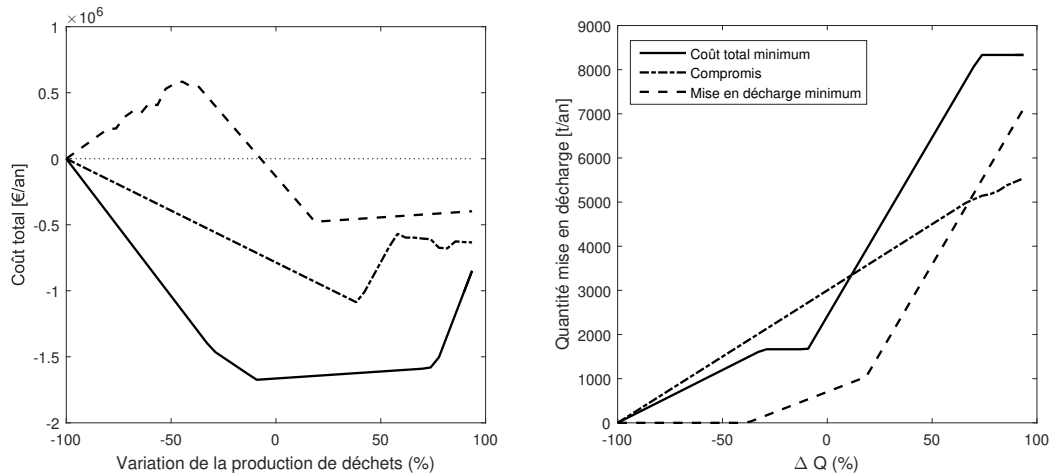


FIGURE 4.4: Évolution du coût total et du flux mis en décharge en fonction de la variation du flux entrant

4.3 Réduction de la quantité de déchets à la source

Une des solutions de gestion des déchets, parfois trop rarement mise en avant, est la simple diminution de leur production en révisant par exemple l’emballage des produits achetés. La conséquence serait une diminution directe de la quantité d’entrée Q . Cette même quantité peut aussi augmenter dans le cas où la population serait amenée à croître. Il semble dès lors intéressant d’étudier la réponse du modèle¹ à une évolution de cette quantité dont on connaît déjà approximativement la limite grâce à l’étude du flot maximum faite au chapitre 3.

Concernant l’évolution des coûts illustrée en figure 4.4, elle semble répondre aux attentes : c’est à dire les coûts toujours les plus bas pour la première alternative et les plus haut pour la minimisation de la mise en décharge. La convergence des valeurs lorsque le flot maximum est approché s’explique par la réduction de marche de manoeuvre, au fur et mesure que les limites de capacités des différentes infrastructures sont atteintes. Concernant la quantité mise en décharge, elle est aussi tout à fait cohérente avec une croissance globale en fonction de ΔQ .

Les figures 4.5 et 4.6 illustrent la priorisation des traitements : d’un côté les moins coûteux (incinération) et de l’autre les plus propres (tri). Une fois que l’occupation maximum du site est atteinte, le second choix est favorisé et ainsi de suite. Les courbes sont moins évidentes à comprendre pour le cas de compromis pour lequel une divergence des répartitions est observée avant même la valeur de flot maximum qui avait été trouvée pour le modèle linéaire (environ 15500 t/an). Il semble qu’il ne s’agisse cependant que d’une coïncidence car cette divergence correspond en réalité à l’atteinte tardive de plusieurs des sites. Si des résultats sont présents pour des quantités entrantes de déchets qui dépassent le flot maximum, ils ne peuvent cependant pas être considérés comme valides. Comme constaté au chapitre précédent, la solution du compromis permet néanmoins une utilisation équilibrée des infrastructures et semble plus robuste.

1. Dû à certaines instabilités du modèle avec bio-méthanisation lorsque Q est modifier, il a été décidé de poursuivre avec le version antérieure (non-linéaire)

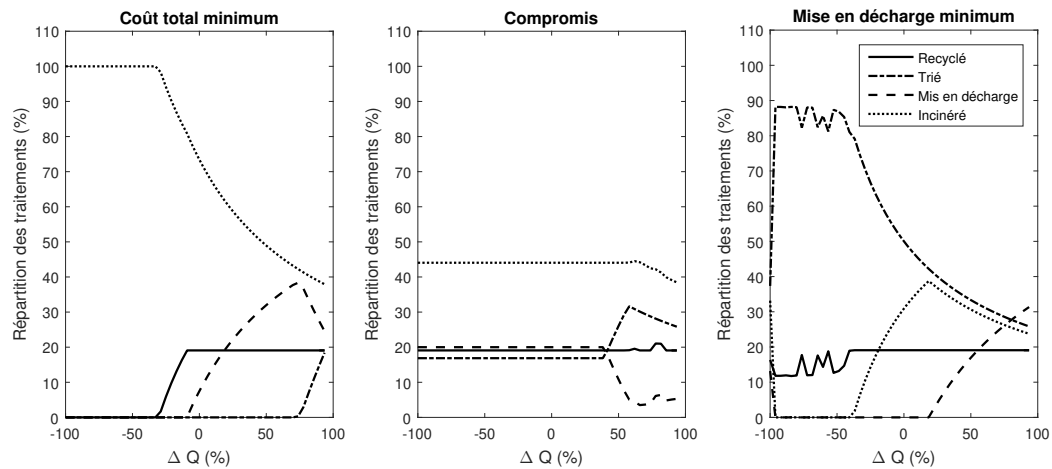


FIGURE 4.5: Distribution à la source en fonction de la variation de flux rentrant

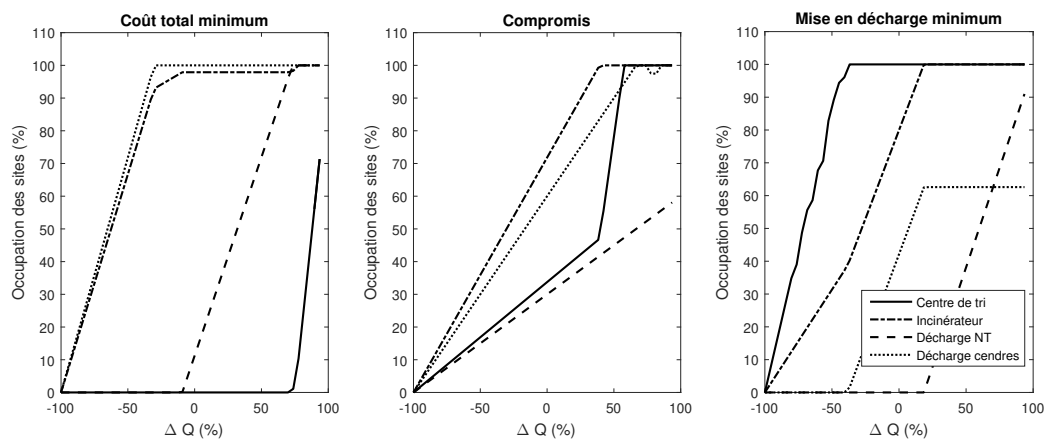


FIGURE 4.6: Évolution des capacité avec la variation du flux rentrant

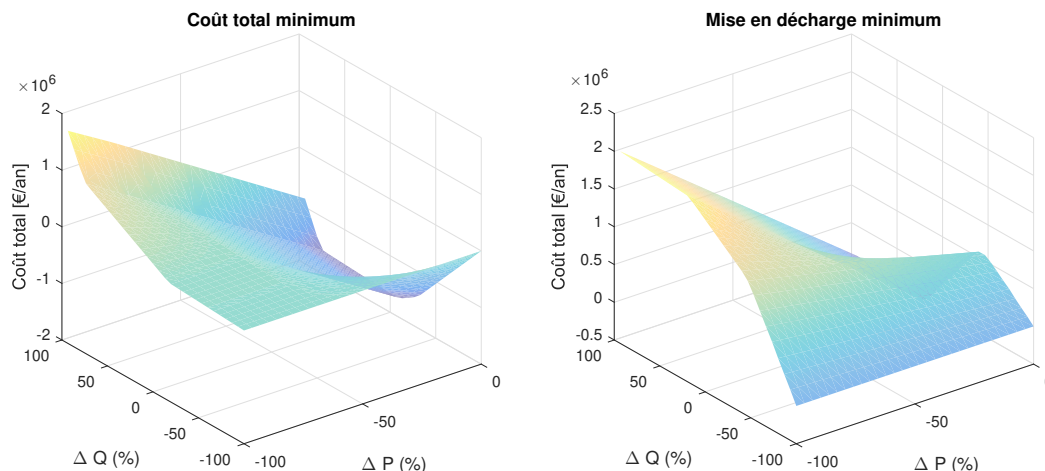


FIGURE 4.7: Évolution du coût total en fonction de la variation de production de déchets (ΔQ) et de la variation de prix de l'énergie (ΔP)

4.4 Analyse de sensibilité plus avancée

Cette dernière extension propose de mêler les résultats trouvés à la section précédente afin de revenir sur des questionnements économiques. Il a été observé que la valorisation énergétique des déchets était grandement privilégiée de par sa rentabilité. Cela indique aussi que la solution risque d'être fort impactée par une variation du prix de vente de l'énergie. C'est donc ce paramètre ΔP qui va maintenant être amené à varier avec la quantité de déchets à la source, donnant ainsi les surfaces de la figure 4.7 (celle correspondant au cas de compromis n'est pas illustrée par souci de mise en page et parce que fort ressemblante à celle du cas 1).

Plus qu'un intérêt esthétique, ces résultats vont permettre de répondre à une question : pour une production de déchets donnée, jusqu'à quelle diminution peut-on aller sans devoir instaurer de taxe d'immondices ? Afin de trouver la solution, il est nécessaire de chercher sur ces surfaces l'iso-contour de coût nul, ou autrement dit le chemin dans l'espace $(\Delta P, \Delta Q)$ sur lequel le coût s'annule. Ce sont ces chemins que l'on retrouve dans la figure 4.8 qui va maintenant être analysée. Il est judicieux de préciser au préalable que la courbe d'objectif de minimisation de la mise en décharge est sensée dépasser 0 (ne colle donc pas l'axe horizontale comme ici).

Le graphique peut être interprété de la manière suivante : la région en-dessous de la courbe consiste en des couples $(\Delta Q, \Delta P)$ pour lesquels le coût est négatif, ce qui correspond à un profit. Il est donc normal de retrouver la courbe du cas 1 la plus en bas car il faudra alors une réduction du prix de l'énergie plus importante avant de recourir à une taxe. C'est tout à fait l'opposé de ce qui est observé pour le cas de la minimisation de la mise décharge qui est la seule alternative qui aurait potentiellement recours à la taxe d'immondices. Le compromis se trouve, lui, à nouveau entre les deux. Une convergence peut aussi à nouveau être observée lorsque les limites du modèle sont atteinte et ce par sa réduction de marge de manoeuvre.

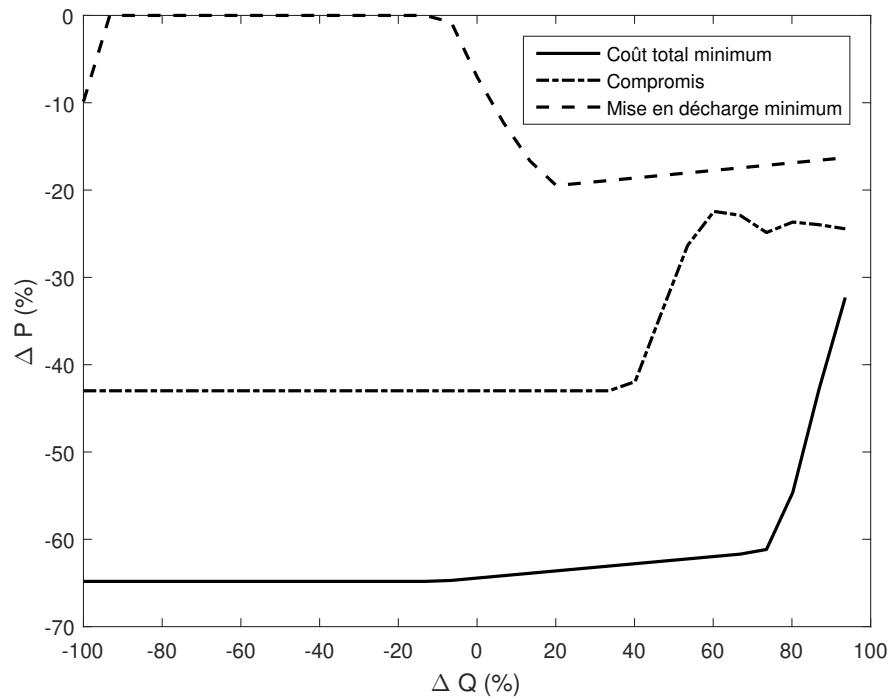


FIGURE 4.8: Couples de variation de production de déchets (ΔQ) et de variation de prix de l'énergie (ΔP) pour lesquels le coût total s'annule

Conclusion

Un modèle d'optimisation prenant en compte plusieurs alternatives de traitement des déchets a été présenté. Trois cas ont été comparés, avec des objectifs respectifs de minimisation du coût total, de minimisation de mise en décharge et de compromis entre les deux. Il est apparu que pour les données utilisées, les trois alternatives amènent toutes à un profit, principalement dû à la contribution de la filière d'incinération très lucrative, ce qui pourrait amener à se questionner sur la validité des données utilisées. Il est aussi observé que l'alternative du compromis permet l'occupation la plus équilibrée et que la mise en décharge sans traitement est globalement une alternative peu favorisée, même lors de la minimisation simple des coûts. Ces constats vont rester inchangés malgré les améliorations apportées au modèle par la suite. L'autre pan de l'analyse concernait l'exploration des limites du modèle en faisant varier certains paramètres tels que la quantité entrante et ou le prix de vente de l'énergie. Il en a résulté un calcul de flot maximum du réseau (pour chaque objectif) et une évaluation de la marge avant que la solution demande d'instaurer une taxe d'immondices.

Bien d'autres améliorations pourraient encore être amenées afin de le rendre plus réaliste comme par exemple la prise en compte du transport entre les différents sites, l'évolution dynamique de la source des déchets ou encore des capacités "minimum" sous lesquelles une installation pourrait être fermée. D'autres objectifs pourraient aussi être proposés tels que la minimisation de l'empreinte carbone qui nécessiterait alors une connaissance très approfondie des filières entrant en jeu. Le modèle actuel aura néanmoins déjà pu mettre en évidence le fait que certains objectifs alternatifs tels la minimisation de la mise en décharge ne correspondent pas forcément à une perte économique, ce qui incitera peut-être des investisseurs à faire des choix plus éthiques à l'avenir.

Bibliographie

- Solidarité laïque, (2013), *L'histoire des déchets et de leur gestion*, Disponible au lien : <https://www.solidarite-laique.org/app/uploads/2017/04/Lhistoire-des-d%C3%A9chets-et-de-leur-gestion.pdf>
- Gérard, Léopold. *Le traitement des déchets organiques ménagers produits par les communes affiliées à l'Intercommunale du Brabant Wallon*. Louvain School of Management, Université catholique de Louvain, 2015. Prom. : Kestemont, Marie-Paule. <http://hdl.handle.net/2078.1/thesis:2797>
- Quentin Adrien Tonneau. *Optimisation de la chaîne logistique des déchets non dangereux*. Recherche opérationnelle [cs.RO]. Ecole nationale supérieure Mines-Télécom Atlantique, 2017.
- ADEME, (2009) *Campagne nationale de caractérisation des ordures ménagères, résultats Année 2007*, Juin 2009.
- Eco-Emballages, *Concevoir, construire et exploiter un centre de tri*, Eco-Emballage édition, 2005.
- EUROSTAT, (2019), *Price developments and volume trade of glass waste EU-28*,
- MANCHERON, C., (2011) , *Enquête sur les prix de l'incinération*, Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'énergie.
- MAYER, N., (2018), *Les centres de stockage des déchets en France*, Futura planète
- Omni Conseil, (2018), *Gestion des mâchefers issus des déchets genevois, Rapport version 4.1*.
- REIX, V., (2006), *Le prix de la mise en décharge des déchets non dangereux générés par les collectivités en 2005*, ADEME.
- GRDF, (2021), *La vente du bio-méthane*, Disponible à l'url : "<https://www.grdf.fr/acteurs-biomethane/vente-biomethane>"

Annexes

Annexe A : Listes de résultats GAMS

Les résultats suivants correspondent à la solution de l'alternative de compromis du modèle non-linéaire, sans ajout d'une infrastructure de bio-méthanisation (donc 31 variables).

```
\begin{verbatim}
```

```
GAMS 34.2.0 r6925a71 Released Feb 5, 2021 WEX-WEI x86 64bit/MS Windows - 06
General Algebraic Modeling System
Compilation
```

```
1 * Optimisation du traitement des dechets menager (tfe)
2 * Code GAMS non-lineaire
3 * Laurent DELEU - Mai 2021
4
6 SETS
7 i      les branches      /Branche1 , Branche2 , Branche3 , Branche4 , Branche5 , B
8 j      les flux          /Papier , Verre , Plastique , Metal , Autre/
9 j1(j)  flux de branche1 /Papier , Verre , Plastique , Metal/
10 j2(j)  flux de branche2 /Papier , Verre , Plastique , Metal , Autre/
11 j3(j)  flux de branche3 /Papier , Verre , Plastique , Metal , Autre/
12 j4(j)  flux de branche4 /Papier , Verre , Plastique , Metal , Autre/
13 j5(j)  flux de branche5 /Papier , Verre , Plastique , Metal/
14 j6(j)  flux de branche6 /Papier , Verre , Plastique , Autre/
15 j7(j)  flux de branche7 /Autre/
16 j8(j)  flux de branche8 /Autre/
17 j9(j)  flux de branche9 /Metal/
18 k      donnees          /CompoSrc , CompoNT , Cendre /;
19
20 PARAMETERS
21 Q quantite entrante      /10000/
22 *Capacites :
23 CapTri                   /5000/
24 CapBrule                 /7500/
25 CapDech                  /6666.67/
26 CapCendre                /1666.67/;
27
28 TABLE Data(j,k) !! Data pour chaque composant
29           CompoSrc      CompoNT      Cendre
30 Papier      0.25        0.1977      0.054
31 Verre       0.13        0.1028      1
32 Plastique   0.11        0.0870      0.1
33 Metal       0.04        0.0316      1
34 Autre       0.47        0.5808      0.1804;
35
36 TABLE Cout(i,j) !! cout de chaque composant sur chaque branche
37           Papier      Verre      Plastique      Metal      Autre
38 Branche1     -133      -55        -335          -255      0
39 Branche2      300       300        300           300      300
40 Branche3      52        52         52            52       52
```

```
41 Branche4      -345.06 150      -872.77      150      -133.93
42 Branche5      -133      -55      -335      -255      0
43 Branche6      91.35 91.35 91.35 0 91.35
44 Branche7      0 0 0 0 -133.93
45 Branche8      0 0 0 0 52
46 Branche9      0 0 0 -255 0;
47
48 VARIABLES
49 F1(j1)        !! variables de flux de branche 1
50 F2(j2)        !! variables de flux de branche 2
51 F3(j3)        !! variables de flux de branche 3
52 F4(j4)        !! variables de flux de branche 4
53 F5(j5)        !! variables de flux de branche 5
54 F6(j6)        !! variables de flux de branche 6
55 F7(j7)        !! variables de flux de branche 7
56 F8(j8)        !! variables de flux de branche 8
57 F9(j9)        !! variables de flux de branche 9
58 Y            !! fraction triee a la source
59 Z            !! variable optimisee ;
60
61 POSITIVE VARIABLES F1, F2, F3, F4, F5, F6, F7, F8, F9, Y ;
62
63 EQUATIONS
64 CONS1        !! conservation du papier au noeud Domicile
65 CONS2        !! conservation du verre au noeud Domicile
66 CONS3        !! conservation du plastique au noeud Domicile
67 CONS4        !! conservation du metal au noeud Domicile
68 CONS5        !! conservation du reste au noeud Domicile
69 CONS6        !! conservation du papier au noeud Centre de tri
70 CONS7        !! conservation du verre au noeud Centre de tri
71 CONS8        !! conservation du plastique au noeud Centre de tri
72 CONS9        !! conservation du metal au noeud Centre de tri
73 CONS10       !! conservation du reste au noeud Centre de tri
74 CONS11       !! conservation du papier au noeud a l'incinerateur
75 CONS12       !! conservation du verre au noeud a l'incinerateur
76 CONS13       !! conservation du plastique au noeud a l'incinerateur
77 CONS14       !! conservation du metal au noeud a l'incinerateur
78 CONS15       !! conservation du reste au noeud a l'incinerateur
79 FRAC1        !! fraction de papier directement recycle
80 FRAC2        !! fraction de verre directement recycle
81 FRAC3        !! fraction de plastique directement recycle
82 FRAC4        !! fraction de metal directement recycle
83 PROP21       !! proportion de papier dans branche 2
84 PROP22       !! proportion de verre dans branche 2
85 PROP23       !! proportion de plastique dans branche 2
```

```

86 PROP24  !! proportion de metal dans branche 2
87 PROP31  !! proportion de papier dans branche 3
88 PROP32  !! proportion de verre dans branche 3
89 PROP33  !! proportion de plastique dans branche 3
90 PROP34  !! proportion de metal dans branche 3
91 CAP1    !! capacite du centre de tri
92 CAP2    !! capacite de l'incinerateur
93 CAP3    !! capacite de la decharge des dechets non traites
94 CAP4    !! capacite de la decharge des cendres
95 TRI     !! tri a la source limite a 36%
96 OBJ
97 CONTR1  !! contrainte de compromis 1
98 CONTR2  !! contrainte de compromis 2
99 ;
100
101 CONS1..  Data('Papier','CompoSrc')*Q =E= F1('Papier') + F2('Papier')
102 CONS2..  Data('Verre','CompoSrc')*Q =E= F1('Verre') + F2('Verre') +
103 CONS3..  Data('Plastique','CompoSrc')*Q =E= F1('Plastique') + F2('Plastic
104 CONS4..  Data('Metal','CompoSrc')*Q =E= F1('Metal') + F2('Metal') +
105 CONS5..  Data('Autre','CompoSrc')*Q =E= F2('Autre') + F3('Autre') +
106 CONS6..  F2('Papier') =E= F5('Papier');
107 CONS7..  F2('Verre') =E= F5('Verre');
108 CONS8..  F2('Plastique') =E= F5('Plastique');
109 CONS9..  F2('Metal') =E= F5('Metal');
110 CONS10.. F2('Autre') =E= F7('Autre') + F8('Autre');
111 CONS11.. F6('Papier') =E= Data('Papier','Cendre') * F4('Papier');
112 CONS12.. F6('Verre') =E= Data('Verre','Cendre') * F4('Verre');
113 CONS13.. F6('Plastique') =E= Data('Plastique','Cendre') * F4('Plastic
114 CONS14.. F9('Metal') =E= F4('Metal');
115 CONS15.. F6('Autre') =E= Data('Autre','Cendre') * F4('Autre');
116 FRAC1..  F1('Papier') =E= Y * Data('Papier','CompoSrc') * Q;
117 FRAC2..  F1('Verre') =E= Y * Data('Verre','CompoSrc') * Q;
118 FRAC3..  F1('Plastique') =E= Y * Data('Plastique','CompoSrc') * Q;
119 FRAC4..  F1('Metal') =E= Y * Data('Metal','CompoSrc') * Q;
120 PROP21.. F2('Papier') =E= Data('Papier','CompoSrc')*(1-Y)/((1-Y)+Y*D
121 PROP22.. F2('Verre') =E= Data('Verre','CompoSrc')*(1-Y)/((1-Y)+Y*Dat
122 PROP23.. F2('Plastique') =E= Data('Plastique','CompoSrc')*(1-Y)/((1-
123 PROP24.. F2('Metal') =E= Data('Metal','CompoSrc')*(1-Y)/((1-Y)+Y*Dat
124 PROP31.. F3('Papier') =E= Data('Papier','CompoSrc')*(1-Y)/((1-Y)+Y*D
125 PROP32.. F3('Verre') =E= Data('Verre','CompoSrc')*(1-Y)/((1-Y)+Y*Dat
126 PROP33.. F3('Plastique') =E= Data('Plastique','CompoSrc')*(1-Y)/((1-
127 PROP34.. F3('Metal') =E= Data('Metal','CompoSrc')*(1-Y)/((1-Y)+Y*Dat
128
129 CAP1..   SUM(j2,F2(j2)) =L= CapTri;
130 CAP2..   SUM(j4,F4(j4)) + F7('Autre') =L= CapBrule;

```

```
131 CAP3..      SUM(j3 ,F3(j3)) + F8('Autre ') =L= CapDech;
132 CAP4..      SUM(j6 ,F6(j6)) =L= CapCendre;
133 TRI..       Y =L= 0.36;
134
135 *OBJ..       Z =E= SUM(j3 ,F3(j3)) + SUM(j6 ,F6(j6)) + F8('Autre ');
136 OBJ..        Z =E= SUM(j1 ,Couts('Branche1 ',j1)*F1(j1))+SUM(j2 ,Couts('Bra
137             +SUM(j4 ,Couts('Branche4 ',j4)*F4(j4))+SUM(j5 ,Couts('Branche5
138             +SUM(j7 ,Couts('Branche7 ',j7)*F7(j7))+SUM(j8 ,Couts('Branche8
139 CONTR1..     SUM(j3 ,F3(j3)) + F8('Autre ') =L= 0.2*Q;
140 CONTR2..     SUM(j6 ,F6(j6)) =L= 0.1*Q;
141
142
143 MODEL PLANIFICATION /ALL/;
144 SOLVE PLANIFICATION USING NLP MINIMIZING Z;
```

```
COMPILATION TIME      =          0.000 SECONDS          3 MB  34.2.0 r6925a71 WEX-WEI
GAMS 34.2.0 r6925a71 Released Feb  5, 2021 WEX-WEI x86 64bit/MS Windows - 06
G e n e r a l   A l g e b r a i c   M o d e l i n g   S y s t e m
Equation Listing      SOLVE PLANIFICATION Using NLP From line 144
```

——— CONS1 =E=

CONS1.. - F1(Papier) - F2(Papier) - F3(Papier) - F4(Papier) =E= -2500 ; (LHS

——— CONS2 =E=

CONS2.. - F1(Verre) - F2(Verre) - F3(Verre) - F4(Verre) =E= -1300 ; (LHS = 0,

——— CONS3 =E=

CONS3.. - F1(Plastique) - F2(Plastique) - F3(Plastique) - F4(Plastique) =E=

——— CONS4 =E=

CONS4.. - F1(Metal) - F2(Metal) - F3(Metal) - F4(Metal) =E= -400 ; (LHS = 0,

——— CONS5 =E=

CONS5.. - F2(Autre) - F3(Autre) - F4(Autre) =E= -4700 ; (LHS = 0, INFES = 47

—— CONS6 =E=

CONS6.. F2(Papier) - F5(Papier) =E= 0 ; (LHS = 0)

—— CONS7 =E=

CONS7.. F2(Verre) - F5(Verre) =E= 0 ; (LHS = 0)

—— CONS8 =E=

CONS8.. F2(Plastique) - F5(Plastique) =E= 0 ; (LHS = 0)

—— CONS9 =E=

CONS9.. F2(Metal) - F5(Metal) =E= 0 ; (LHS = 0)

—— CONS10 =E=

CONS10.. F2(Autre) - F7(Autre) - F8(Autre) =E= 0 ; (LHS = 0)

—— CONS11 =E=

CONS11.. - 0.054*F4(Papier) + F6(Papier) =E= 0 ; (LHS = 0)

—— CONS12 =E=

CONS12.. - F4(Verre) + F6(Verre) =E= 0 ; (LHS = 0)

—— CONS13 =E=

CONS13.. - 0.1*F4(Plastique) + F6(Plastique) =E= 0 ; (LHS = 0)

—— CONS14 =E=

CONS14.. - F4(Metal) + F9(Metal) =E= 0 ; (LHS = 0)

—— CONS15 =E=

$$\text{CONS15.. } - 0.1804 * \text{F4}(\text{Autre}) + \text{F6}(\text{Autre}) =E= 0 ; (\text{LHS} = 0)$$

—— FRAC1 =E=

$$\text{FRAC1.. } \text{F1}(\text{Papier}) - 2500 * \text{Y} =E= 0 ; (\text{LHS} = 0)$$

—— FRAC2 =E=

$$\text{FRAC2.. } \text{F1}(\text{Verre}) - 1300 * \text{Y} =E= 0 ; (\text{LHS} = 0)$$

—— FRAC3 =E=

$$\text{FRAC3.. } \text{F1}(\text{Plastique}) - 1100 * \text{Y} =E= 0 ; (\text{LHS} = 0)$$

—— FRAC4 =E=

$$\text{FRAC4.. } \text{F1}(\text{Metal}) - 400 * \text{Y} =E= 0 ; (\text{LHS} = 0)$$

—— PROP21 =E=

$$\text{PROP21.. } (0.75) * \text{F2}(\text{Papier}) - (0.25) * \text{F2}(\text{Verre}) - (0.25) * \text{F2}(\text{Plastique}) - (0.25) * \text{F2}(\text{Metal}) =E= 0 ; (\text{LHS} = 0)$$

—— PROP22 =E=

$$\text{PROP22.. } - (0.13) * \text{F2}(\text{Papier}) + (0.87) * \text{F2}(\text{Verre}) - (0.13) * \text{F2}(\text{Plastique}) - (0.13) * \text{F2}(\text{Metal}) =E= 0 ; (\text{LHS} = 0)$$

—— PROP23 =E=

$$\text{PROP23.. } - (0.11) * \text{F2}(\text{Papier}) - (0.11) * \text{F2}(\text{Verre}) + (0.89) * \text{F2}(\text{Plastique}) - (0.11) * \text{F2}(\text{Metal}) =E= 0 ; (\text{LHS} = 0)$$

—— PROP24 =E=

$$\text{PROP24.. } - (0.04) * \text{F2}(\text{Papier}) - (0.04) * \text{F2}(\text{Verre}) - (0.04) * \text{F2}(\text{Plastique}) + (0.04) * \text{F2}(\text{Metal}) =E= 0 ; (\text{LHS} = 0)$$

—— PROP31 =E=

$$\text{PROP31.. } (0.75)*F3(\text{Papier}) - (0.25)*F3(\text{Verre}) - (0.25)*F3(\text{Plastique}) - (0.25)*F3(\text{Metal}) - (0.25)*F3(\text{Autre}) =E= 0$$

—— PROP32 =E=

$$\text{PROP32.. } - (0.13)*F3(\text{Papier}) + (0.87)*F3(\text{Verre}) - (0.13)*F3(\text{Plastique}) - (0.13)*F3(\text{Metal}) - (0.13)*F3(\text{Autre}) =E= 0$$

—— PROP33 =E=

$$\text{PROP33.. } - (0.11)*F3(\text{Papier}) - (0.11)*F3(\text{Verre}) + (0.89)*F3(\text{Plastique}) - (0.11)*F3(\text{Metal}) - (0.11)*F3(\text{Autre}) =E= 0$$

—— PROP34 =E=

$$\text{PROP34.. } - (0.04)*F3(\text{Papier}) - (0.04)*F3(\text{Verre}) - (0.04)*F3(\text{Plastique}) + (0.04)*F3(\text{Metal}) + (0.04)*F3(\text{Autre}) =E= 0$$

—— CAP1 =L=

$$\text{CAP1.. } F2(\text{Papier}) + F2(\text{Verre}) + F2(\text{Plastique}) + F2(\text{Metal}) + F2(\text{Autre}) =L= 50$$

—— CAP2 =L=

$$\text{CAP2.. } F4(\text{Papier}) + F4(\text{Verre}) + F4(\text{Plastique}) + F4(\text{Metal}) + F4(\text{Autre}) + F7(\text{Autre}) =L= 50$$

—— CAP3 =L=

$$\text{CAP3.. } F3(\text{Papier}) + F3(\text{Verre}) + F3(\text{Plastique}) + F3(\text{Metal}) + F3(\text{Autre}) + F8(\text{Autre}) =L= 50$$

—— CAP4 =L=

$$\text{CAP4.. } F6(\text{Papier}) + F6(\text{Verre}) + F6(\text{Plastique}) + F6(\text{Autre}) =L= 1666.67 ; (\text{LHS} = 0)$$

—— TRI =L=

$$\text{TRI.. } Y =L= 0.36 ; (\text{LHS} = 0)$$

—— OBJ =E=

OBJ.. 133*F1(Papier) + 55*F1(Verre) + 335*F1(Plastique) + 255*F1(Metal) - 30

—— CONTR1 =L=

CONTR1.. F3(Papier) + F3(Verre) + F3(Plastique) + F3(Metal) + F3(Autre) + F8

—— CONTR2 =L=

CONTR2.. F6(Papier) + F6(Verre) + F6(Plastique) + F6(Autre) =L= 1000 ; (LHS :

GAMS 34.2.0 r6925a71 Released Feb 5, 2021 WEX-WEI x86 64bit/MS Windows - 06
 G e n e r a l A l g e b r a i c M o d e l i n g S y s t e m
 Column Listing SOLVE PLANIFICATION Using NLP From line 144

—— F1

F1(Papier)

	(.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
-1	CONS1
1	FRAC1
133	OBJ

F1(Verre)

	(.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
-1	CONS2
1	FRAC2
55	OBJ

F1(Plastique)

	(.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
-1	CONS3
1	FRAC3
335	OBJ

REMAINING ENTRY SKIPPED

—— F2

F2(Papier)

F3 Liste de résultats GAMS

	(.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
-1	CONS1
1	CONS6
(0.75)	PROP21
(-0.13)	PROP22
(-0.11)	PROP23
(-0.04)	PROP24
1	CAP1
-300	OBJ

F2(Verre)

	(.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
-1	CONS2
1	CONS7
(-0.25)	PROP21
(0.87)	PROP22
(-0.11)	PROP23
(-0.04)	PROP24
1	CAP1
-300	OBJ

F2(Plastique)

	(.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
-1	CONS3
1	CONS8
(-0.25)	PROP21
(-0.13)	PROP22
(0.89)	PROP23
(-0.04)	PROP24
1	CAP1
-300	OBJ

REMAINING 2 ENTRIES SKIPPED

—— F3

F3(Papier)

	(.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
-1	CONS1
(0.75)	PROP31
(-0.13)	PROP32
(-0.11)	PROP33
(-0.04)	PROP34
1	CAP3
-52	OBJ

Annexe

REMAINING Liste de résultats GAMS

1	CONTR1	
F3(Verre)		(.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
-1	CONS2	
(-0.25)	PROP31	
(0.87)	PROP32	
(-0.11)	PROP33	
(-0.04)	PROP34	
1	CAP3	
-52	OBJ	
1	CONTR1	

F3(Plastique)		(.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
-1	CONS3	
(-0.25)	PROP31	
(-0.13)	PROP32	
(0.89)	PROP33	
(-0.04)	PROP34	
1	CAP3	
-52	OBJ	
1	CONTR1	

REMAINING 2 ENTRIES SKIPPED

—— F4

F4(Papier)		(.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
-1	CONS1	
-0.054	CONS11	
1	CAP2	
345.06	OBJ	

F4(Verre)		(.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
-1	CONS2	
-1	CONS12	
1	CAP2	
-150	OBJ	

F4(Plastique)		(.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
-1	CONS3	
-0.1	CONS13	
1	CAP2	

872.77 OBJ
 REMAINING 2 ENTRIES SKIPPED
 ——— F5

F5(Papier)
 (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
 -1 CONS6
 133 OBJ

F5(Verre)
 (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
 -1 CONS7
 55 OBJ

F5(Plastique)
 (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
 -1 CONS8
 335 OBJ

REMAINING ENTRY SKIPPED

——— F6

F6(Papier)
 (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
 1 CONS11
 1 CAP4
 -91.35 OBJ
 1 CONTR2

F6(Verre)
 (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
 1 CONS12
 1 CAP4
 -91.35 OBJ
 1 CONTR2

F6(Plastique)
 (.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
 1 CONS13
 1 CAP4
 -91.35 OBJ
 1 CONTR2

REMAINING ENTRY SKIPPED

Annexe Liste de résultats GAMS

—— F7

F7(Autre)

	(.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
-1	CONS10
1	CAP2
133.93	OBJ

—— F8

F8(Autre)

	(.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
-1	CONS10
1	CAP3
-52	OBJ
1	CONTR1

—— F9

F9(Metal)

	(.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
1	CONS14
255	OBJ

—— Y

Y

	(.LO, .L, .UP, .M = 0, 0, +INF, 0)
-2500	FRAC1
-1300	FRAC2
-1100	FRAC3
-400	FRAC4
(0)	PROP21
(0)	PROP22
(0)	PROP23
(0)	PROP24
(0)	PROP31
(0)	PROP32
(0)	PROP33
(0)	PROP34
1	TRI

—— Z

Z

1 (.LO, .L, .UP, .M = -INF, 0, +INF, 0)
 OBJ

GAMS 34.2.0 r6925a71 Released Feb 5, 2021 WEX-WEI x86 64bit/MS Windows - 06
G e n e r a l A l g e b r a i c M o d e l l i n g S y s t e m
Model Statistics SOLVE PLANIFICATION Using NLP From line 144

MODEL STATISTICS

BLOCKS OF EQUATIONS	35	SINGLE EQUATIONS	35
BLOCKS OF VARIABLES	11	SINGLE VARIABLES	32
NON ZERO ELEMENTS	159	NON LINEAR N-Z	48
CODE LENGTH	136	CONSTANT POOL	24

GENERATION TIME = 0.016 SECONDS 4 MB 34.2.0 r6925a71 WEX-WEI
GAMS 34.2.0 r6925a71 Released Feb 5, 2021 WEX-WEI x86 64bit/MS Windows - 06
G e n e r a l A l g e b r a i c M o d e l l i n g S y s t e m
Solution Report SOLVE PLANIFICATION Using NLP From line 144

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

MODEL	PLANIFICATION	OBJECTIVE	Z
TYPE	NLP	DIRECTION	MINIMIZE
SOLVER	CONOPT	FROM LINE	144

**** SOLVER STATUS 1 Normal Completion
**** MODEL STATUS 2 Locally Optimal
**** OBJECTIVE VALUE -785936.1094

RESOURCE USAGE, LIMIT	0.015	10000000000.000
ITERATION COUNT, LIMIT	7	2147483647
EVALUATION ERRORS	0	0

—— *** This solver runs with a demo license. No commercial use.

Bagsvaerdvej 246 A
 DK-2880 Bagsvaerd, Denmark

The model has 32 variables and 35 constraints
 with 159 Jacobian elements, 48 of which are nonlinear.
 The Hessian of the Lagrangian has 1 elements on the diagonal,
 10 elements below the diagonal, and 11 nonlinear variables.

** Warning ** The value of LFITER is out of range.
 LFITER is decreased from 2147483647 to 1000000000.

Pre-triangular equations: 0
 Post-triangular equations: 6
 Definitional equations: 4

** Optimal solution. There are no superbasic variables.

CONOPT time Total 0.000 seconds
 of which: Function evaluations 0.000 = 0.0%
 1st Derivative evaluations 0.000 = 0.0%

MARGINAL	LOWER	LEVEL	UPPER
—— EQU CONS1 258.7236	-2500.0000	-2500.0000	-2500.0000
—— EQU CONS2 -1748.8229	-1300.0000	-1300.0000	-1300.0000
—— EQU CONS3 712.8877	-1100.0000	-1100.0000	-1100.0000
—— EQU CONS4 105.0000	-400.0000	-400.0000	-400.0000
—— EQU CONS5 -154.4977	-4700.0000	-4700.0000	-4700.0000
—— EQU CONS6 133.0000	.	.	.
—— EQU CONS7 55.0000	.	.	.
—— EQU CONS8 335.0000	.	.	.
—— EQU CONS9 255.0000	.	.	.

—— EQU CONS10	.	.	.
133.9300			
—— EQU CONS11	.	.	.
1598.8229			
—— EQU CONS12	.	.	.
1598.8229			
—— EQU CONS13	.	.	.
1598.8229			
—— EQU CONS14	.	.	.
-255.0000			
—— EQU CONS15	.	.	.
1598.8229			
—— EQU FRAC1	.	.	.
125.7236			
—— EQU FRAC2	.	.	.
-1803.8229			
—— EQU FRAC3	.	.	.
377.8877			
—— EQU FRAC4	.	.	.
-150.0000			
—— EQU PROP21	.	.	.
414.1512			
—— EQU PROP22	.	.	.
-1515.3953			
—— EQU PROP23	.	.	.
666.3154			
—— EQU PROP24	.	.	.
138.4277			
—— EQU PROP31	.	.	.
413.2212			
—— EQU PROP32	.	.	.
-1594.3253			
—— EQU PROP33	.	.	.
867.3854			
—— EQU PROP34	.	.	.
259.4977			
—— EQU CAP1	-INF	1686.2244	5000.0000
.			
—— EQU CAP2	-INF	5385.1694	7500.0000
.			
—— EQU CAP3	-INF	2000.0000	6666.6700
.			
—— EQU CAP4	-INF	1000.0000	1666.6700
.			

Annexe
Autre Liste de résultats GAMS

—— EQU TRI	–INF	0.3600	0.3600
–1.659910E+6			
—— EQU OBJ	.	.	.
1.0000			
—— EQU CONTR1	–INF	2000.0000	2000.0000
–101.0461			
—— EQU CONTR2	–INF	1000.0000	1000.0000
–1507.4729			

—— VAR F1

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
Papier	.	900.0000	+INF	.
Verre	.	468.0000	+INF	.
Plastique	.	396.0000	+INF	.
Metal	.	144.0000	+INF	.

—— VAR F2

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
Papier	.	333.4106	+INF	.
Verre	.	173.3735	+INF	.
Plastique	.	146.7007	+INF	.
Metal	.	53.3457	+INF	.
Autre	.	979.3938	+INF	.

—— VAR F3

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
Papier	.	395.4523	+INF	.
Verre	.	205.6352	+INF	.
Plastique	.	173.9990	+INF	.
Metal	.	63.2724	+INF	.
Autre	.	1161.6411	+INF	.

—— VAR F4

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
Papier	.	871.1371	+INF	.
Verre	.	452.9913	+INF	.
Plastique	.	383.3003	+INF	.

Annexe Liste de résultats GAMS

Metal	.	139.3819	+INF	.
Autre	.	2558.9651	+INF	.
—— VAR F5				
	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
Papier	.	333.4106	+INF	.
Verre	.	173.3735	+INF	.
Plastique	.	146.7007	+INF	.
Metal	.	53.3457	+INF	.
—— VAR F6				
	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
Papier	.	47.0414	+INF	.
Verre	.	452.9913	+INF	.
Plastique	.	38.3300	+INF	.
Autre	.	461.6373	+INF	.
—— VAR F7				
	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
Autre	.	979.3938	+INF	.
—— VAR F8				
	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
Autre	.	.	+INF	286.9761
—— VAR F9				
	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
Metal	.	139.3819	+INF	.
		LOWER	LEVEL	UPPER
MARGINAL				
—— VAR Y				
		.	0.3600	+INF
—— VAR Z				
		-INF	-785936.1094	+INF
				.

Annexe : Liste de résultats GAMS

**** REPORT SUMMARY : 0 NONOPT
 0 INFEASIBLE
 0 UNBOUNDED
 0 ERRORS

EXECUTION TIME = 0.031 SECONDS 4 MB 34.2.0 r6925a71 WEX-WE

USER: GAMS Demo license for Laurent Deleu
 UCLouvain, Belgium

G210219|0002CO-GEN
 DL032709

**** FILE SUMMARY

Input C:\Users\deleu\OneDrive\Documents\TFE\Code GAMS\code_non_lineaire.
Output C:\Users\deleu\OneDrive\Documents\TFE\Code GAMS\code_non_lineaire.
\end{verbatim*}

Abstract :

This thesis deals with the optimization of a waste management problem in which various alternatives of treatment are proposed and in which not only cost minimization is considered. The use of certain assumptions allows to obtain a linear formulation of the mode. The results of the GAMS simulations are compared between the various cases of chosen objective. Some improvements are then brought in order to approach reality. Several sensibility analysis are achieved during the process in order to explore the limits of the model. It appears that incineration is often preferred over other treatment and that some objectives bring more robustness than others.

Résumé :

Ce travail concerne l'optimisation d'un problème de gestion des déchets dans laquelle plusieurs alternatives de revalorisation des déchets sont proposées et en ne considérant pas que des critères de minimisation des coûts. L'usage de certaines hypothèses permet d'obtenir une formulation linéaire du problème. Les résultats de simulations GAMS sont alors comparés entre les différentes alternatives d'objectif. Certaines améliorations sont ensuite apportées afin de se rapprocher de la réalité. Plusieurs analyses de sensibilité sont réalisées sur le même temps afin d'explorer les limites du modèle. Il apparaîtra entre autre que la valorisation énergétique est la filière plus souvent privilégiée et que certains objectifs apportent plus de robustesse au modèle que d'autres.

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