

MODÉLISATION ET SIMULATION DE LA GESTION ET DU TRAITEMENT DES DÉCHETS MÉNAGERS

Bruno Debray*

*École nationale supérieure des mines de Saint-Étienne, Centre SITE

La gestion intégrée des ordures ménagères, qui se développe en réponse aux évolutions réglementaires issues de la loi de 1992, se traduit par une diversification des filières de traitement et une complexification du système de gestion associé. Pour aider les collectivités territoriales à appréhender cette complexité nous avons entrepris de développer un modèle de simulation dont nous présentons ici les principaux composants ainsi que quelques exemples de résultats de simulation. Parmi les objectifs qui peuvent justifier l'utilisation d'un tel outil, nous pouvons citer la comparaison de différents scénarios de gestion sur une base financière ou environnementale ou l'évaluation de l'impact de décisions telles que l'adhésion de communes à un syndicat sur l'évolution des flux reçus et émis par les installations de traitement implantées sur un territoire. Le modèle proposé repose sur un assemblage de modèles linéaires d'unités de traitement et de flux de matière et financiers. Chacun d'entre eux doit être choisi en fonction des objectifs de la simulation parmi les éléments d'une base de données. Celle-ci propose déjà un ensemble de modèles orienté vers l'évaluation des coûts de traitement. Elle doit maintenant être complétée pour répondre à de nouveaux objectifs de simulation.

The management of household waste is evolving rapidly under the regulatory pressure, which was initiated in France by the 1992 law. Traditionally based on standard collections and landfilling, it now involves new treatment techniques such as incineration, recycling or composting. When adapting their waste management system, local communities are facing difficult decisions. Choices have to be made regarding the treatment techniques and waste collection schemes. But it is often difficult to evaluate the technical, environmental and financial consequences of these choices. For that reason, a computer simulation system was developed at the Ecole nationale supérieure des mines de Saint-Etienne. Its main features are presented together with examples of simulation results. Among the situations that can lead to the use of this computer tool we can mention the comparison of different treatment scenarios on a financial or environmental basis or the assess-

ment of decisions such as the union of waste treatment syndicates. The proposed model is based on the combination of individual models of treatment units and of mater and money fluxes. Each of these models has to be chosen according to the simulation goals in a database which can be increased with time to better reflect the diversity of situations.

INTRODUCTION

Au cours des dix dernières années, la gestion des déchets ménagers est passée d'un modèle simple (figure 1.) autour de la collecte ordinaire et de la mise en décharge ou de l'incinération sans valorisation énergétique à une approche beaucoup plus complexe qualifiée maintenant de gestion intégrée des déchets dont un exemple est représenté par la figure 2. Cette évolution a été initiée et accompagnée par la législation et, notamment, en France, par la loi de 1992 qui a introduit la notion de déchet ultime et mis en avant l'objectif de valorisation et de détoxification. La gestion intégrée se traduit par une diversification des filières de traitement. Le recyclage matière, le compostage et l'incinération avec récupération d'énergie viennent s'ajouter à la décharge ou l'incinération simple pour compléter le dispositif. Les collectivités sont alors confrontées à des choix et des décisions aux conséquences politiques, financières et techniques considérables. Face à cette problématique, les communes sont parfois mal armées pour envisager les différents scénarios possibles et pour analyser les conséquences de leurs choix. Par ailleurs, la gestion intégrée des déchets constitue un champs nouveau d'enseignement dans les écoles d'ingénieurs, qui

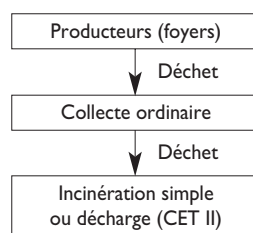


Figure 1 : Schéma classique de gestion des ordures ménagères en France avant l'adoption de la loi de 1992

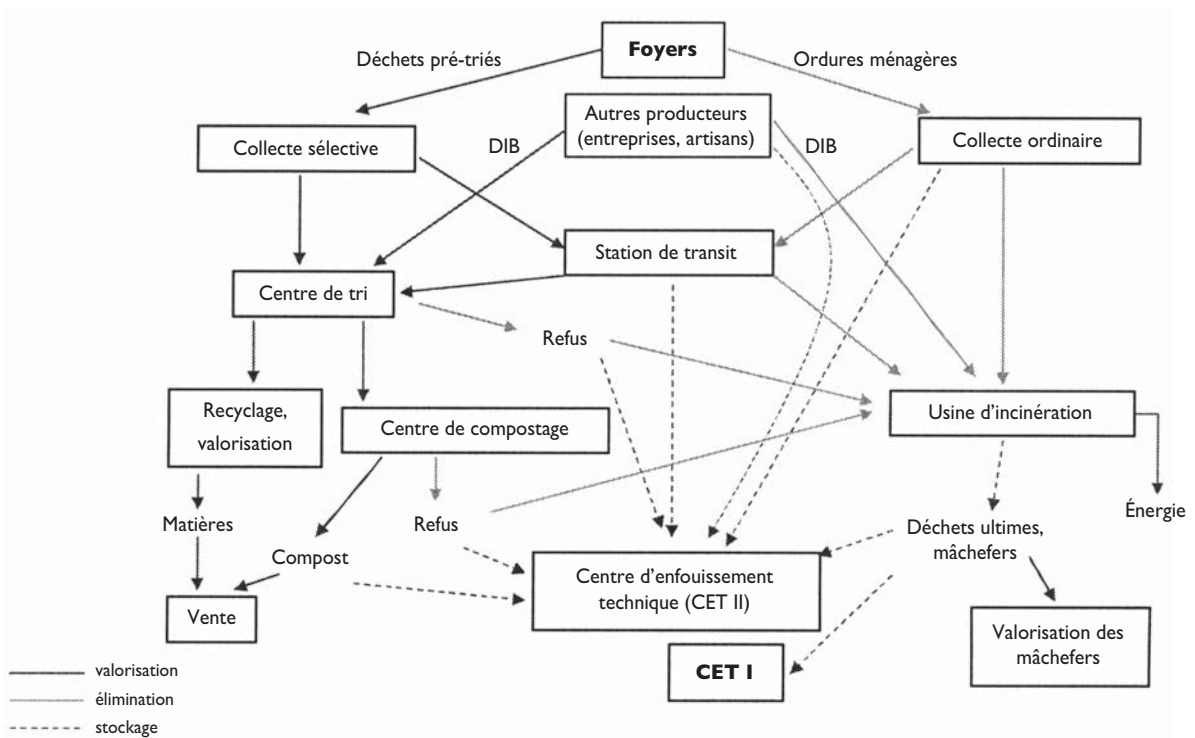


Figure 2 : Exemple d'organisation d'une gestion intégrée des déchets ménagers et assimilés à l'échelle d'un territoire en application du concept de déchet ultime

justifie le développement d'outils pédagogiques innovants. C'est pour répondre à ce double enjeu que nous avons entrepris de développer un modèle de simulation, que nous avons implanté dans un simulateur.

Nous verrons dans un premier temps comment la gestion intégrée des déchets induit une approche nouvelle des flux et des unités de traitement. Nous présenterons ensuite les différents composants du modèle proposé dont nous illustrerons le fonctionnement sur des données issues du cas d'une communauté de communes de la région Rhône-Alpes. Enfin nous conclurons sur les apports potentiels d'un tel modèle et sur ses perspectives d'évolution à plus long terme.

LA GESTION INTEGRÉE DES ORDURES MÉNAGÈRES

Vers une diversification des filières de traitement

La gestion intégrée des déchets ménagers est donc avant tout le recours à une variété plus importante de filières de traitement. Cette diversification répond à plusieurs objectifs.

- Une réduction des impacts.

Même si la décharge est une technique maintenant maîtrisée, qui génère des impacts réduits lorsque ses effluents, lixiviats et biogaz sont correctement traités, elle n'en demeure pas moins une technique problématique compte tenu de la durée d'activité d'un site et de son emprise sur le paysage. La gestion intégrée des déchets vise à réduire les impacts

liés au traitement des déchets en utilisant des techniques dont l'impact est maîtrisé et limité à la durée du traitement. Ces techniques sont principalement l'incinération, le compostage et le tri/recyclage, mais d'autres filières voient le jour régulièrement, comme la méthanisation ou la pyrolyse.

- Une valorisation des déchets

Au delà de la réduction des impacts, l'objectif des nouvelles filières est aussi de permettre une récupération maximum de matière ou d'énergie au cours du cycle de vie du déchet. Celle-ci se traduit dans certaines circonstances par un gain financier direct lié à la vente des produits ainsi récupérés. Cependant cette rentabilité économique de la valorisation est très dépendante des solutions techniques retenues et du contexte local (existence d'un marché local pour l'énergie, par exemple). Elle est aussi très sensible à la qualité des produits et au rendement atteint par les collectes sélectives, qui conditionnent le niveau de subvention par les organismes Eco-Emballages et Adelphe.

- Une plus grande flexibilité

Par ailleurs, les exigences environnementales ne cessent de se renforcer. Le gisement de déchets ménagers voit sa composition évoluer en permanence du fait des changements de mode de consommation. L'offre technologique progresse de jour en jour. Dans ce contexte les acteurs de la filière déchets cherchent de plus en plus à garantir la flexibilité des systèmes de gestion et de traitement qu'ils mettent en place. Cette flexibilité passe notamment par une plus grande modularité des systèmes de gestion, par le recours à des filières plus poly-

valentes et par une plus grande concertation territoriale.

Vers une complexification des flux

Flux de matière : la composition a de l'importance

Parmi les conséquences principales de cette diversification des filières de traitement on peut souligner l'importance nouvelle que prend la composition des flux de déchets. La mise en décharge était une filière peu exigeante sur les caractéristiques du produit entrant. Les nouvelles filières sont par nature beaucoup plus sensibles à la qualité du déchet qu'elles doivent traiter. Un incinérateur, par exemple requiert un matériau de PCI (pouvoir calorifique inférieur) suffisant, le compostage est réservé aux déchets organiques, et, même, souvent aux seuls déchets verts, enfin, la valorisation matière impose des produits de qualité optimale issus d'un tri à a source combiné au tri dans une installation de traitement spécifique.

On passe ainsi d'un système à flux unique de déchets en mélange à des flux multiples dont les caractéristiques, qui déterminent l'efficacité des traitements, dépendent largement des modes de collecte mis en place (eux mêmes dictés par les choix en matière de traitement) et des comportements des populations. Ainsi, la mise en place d'une collecte sélective en vue de la valorisation matière d'une part du gisement a-t-elle des répercussions sur les caractéristiques du flux résiduel, notamment sur sa capacité à être incinéré.

Flux financiers : des coûts nouveaux apparaissent mais aussi des acteurs et des circuits nouveaux

Sur le plan financier aussi le modèle se complexifie. Les communes agissent de plus en plus souvent dans le cadre de structures intercommunales croisées et ont fréquemment recours à des opérateurs privés. Par ailleurs, la mise en place de systèmes de valorisation fait apparaître des recettes nouvelles, en particulier, le système Eco-Emballages et Adelphe mis en place par le décret du 1^{er} avril 1992, qui prévoit une redistribution des contributions des producteurs d'emballages aux communes sous forme de soutien à la tonne triée dont le montant varie en fonction du rendement de la collecte sélective.

OBJECTIFS DE MULTIMISE

Cette complexification globale du système pose des problèmes aux acteurs de la gestion des déchets, à commencer par les collectivités territoriales :

- choix des filières de traitement
- définition des modes de collecte adaptés aux filières choisies
- optimisation générale du système
- évaluation des coûts des solutions retenues

Pour palier ces difficultés, nous avons entrepris de développer un modèle de simulation de la gestion des déchets ménagers et assimilés. Celui-ci doit permettre de calculer l'ensemble

des flux de matières et financiers générés par une configuration de gestion caractérisée par des zones géographiques productrices et des unités de collecte et de traitement des déchets. Nous l'avons voulu adaptable en fonction des objectifs de la simulation qui peuvent être variés : évaluation des impacts environnementaux d'une configuration de gestion, anticipation des coûts induits par des décisions techniques ou politiques, comparaison de deux schémas directeurs de gestion, etc...

Un modèle dynamique

Une des premières caractéristiques que doit posséder notre modèle c'est d'être dynamique, c'est à dire de permettre la représentation de l'évolution du système en fonction du temps pour tenir compte des évolutions du gisement et des modes de traitement mais aussi des fluctuations aléatoires du gisement d'ordures ménagères. La mise en place d'un nouveau système de gestion des déchets n'est jamais instantanée. Elle se fait progressivement au gré des constructions d'installations de traitement et du développement des collectes sélectives. Pour ces dernières, la participation des populations n'est pas immédiate. Le rendement (quantités collectées/quantités théoriquement disponibles) et la qualité des produits collectés évoluent progressivement avec la compréhension des principes et de l'intérêt de la collecte sélective par les populations concernées.

Un modèle modulaire et adaptatif

Un système de gestion intégré des déchets est un ensemble composé de différentes unités de traitement reliées entre elles par des flux de matière et des flux financiers. Si la finalité et l'organisation générale du système sont toujours à peu près les mêmes, il est possible d'envisager une infinité de combinaisons à partir de composantes de base. Le modèle que nous proposons doit reprendre cette logique de modularité. Il doit permettre, à terme, de représenter n'importe quel assemblage plus ou moins complexe d'unités de production et de traitement.

MODÈLE GÉNÉRAL DE MULTIMISE

Unités de traitement

Pour répondre aux objectifs généraux énoncés ci-dessus, nous avons retenu un modèle dynamique linéaire sans rétroaction dans lequel chaque unité de traitement est représentée par une relation linéaire entre les entrants et les sortants de type :

$$Y = AX + B$$

Où Y, X et B sont des vecteurs dont chaque dimension représente des quantités de différents matériaux ou des coûts, et A est une matrice de transformation qui définit les quantités et la nature des sorties en fonction des entrées. Les unités représentées dans notre modèle peuvent se comporter soit en générateur de flux - il s'agit principalement des zones géographiques - et, dans ce cas, la matrice A est nulle, soit en transformateur de flux, ce qui est le cas des

unités de traitement de déchets. Le modèle global est obtenu par assemblage des modèles individuels des unités de traitement qui sont reliées entre elles par des flux de matières et des flux financiers. À ce jour, les unités pouvant intervenir dans notre systèmes sont celles listées dans le tableau 1. Il est à noter que les collectes et le transport sont considérés comme des unités de traitement particulières qui n'ont pas de fonction de transformation des déchets mais génèrent des coûts et, éventuellement, des impacts. La nature des flux est très variable. On y retrouve des ordures ménagères, des DIB, des flux issus de collectes sélectives mais aussi des eaux usées, des mâchefers, des lixiviats, etc... Les flux effectivement pris en compte au cours d'une simulation dépendent des modèles (matrices A et vecteurs B) retenus pour les unités de traitement.

Les coefficients de la matrice A et les coordonnées du vecteur B sont calculés à partir de variables caractéristiques pi de chaque unité et peuvent aussi faire intervenir les coordonnées du vecteur d'entrée X. La relation doit donc en réalité s'écrire :

$$Y_i = A_i(X_i, p_i)X_i + B_i$$

Par exemple, une unité d'incinération reçoit des déchets qu'elle transforme en mâchefers, Refiom (résidus d'épuration des fumées) et vapeur. Cette unité génère aussi des coûts fixes et des coûts proportionnels. Ceci peut s'écrire comme indiqué dans le tableau 2.

Ces différents flux sont ensuite orientés vers des installations de traitement pour les mâchefers et Refiom et vers des utilisateurs pour la vapeur, générant ainsi de nouveaux coûts et de nouvelles recettes.

Les valeurs que nous utilisons pour les coefficients sont issues de la littérature, en particulier l'étude réalisée par Sofres conseil et l'AMF [1] sur les coûts de traitement des déchets ménagers et l'ouvrage de Le Goux et Le Douce [2] sur l'incinération ainsi que diverses études de l'Ademe et d'autres auteurs [3,4]. Ces modèles ont été inventoriés et

évalués dans le cadre d'un travail de DEA à l'Ecole des mines de Saint-Etienne [5,6]. D'autres modèles peuvent naturellement être implantés en fonction des objectifs de simulation. Ainsi, il serait envisageable d'utiliser Multimise dans le cadre d'une analyse de cycle de vie. Il faudrait pour cela considérer les flux de polluants générés par les installations de traitement mais aussi les flux de pollution à la source éventuellement compensés ou évités par le recours à des techniques de valorisation. Les modèles correspondant sont, au moins en partie disponibles dans la littérature [7]. La qualité du modèle global dépend naturellement de la qualité des modèles des unités de traitement. En parallèle au développement du simulateur, il est naturellement nécessaire de continuer à améliorer les modèles des différentes unités de traitement ainsi que les critères d'utilisation des modèles dans différents contextes d'aide à la décision. Certains modèles sont, en effet plus adaptés à une étude initiale destinée à évaluer la faisabilité globale d'une gestion intégrée et à dimensionner de manière approximative les différentes unités de traitement. D'autres, au contraire, permettent une analyse plus fine des flux de matières et des flux financiers. Ces derniers modèles font naturellement intervenir des paramètres plus nombreux pour lesquels il est nécessaire de disposer de plus de données.

Flux

Les sorties de chaque unité de traitement constituent des flux qui possèdent deux caractéristiques principales : leur débit massique et leur composition. Les flux peuvent être intégralement ou en partie seulement orientés vers des filières de traitement constitutives du modèle. Si plusieurs flux de même nature aboutissent à une même unité de traitement ils sont additionnés. Inversement, un même flux peut être divisé en plusieurs sous-flux aboutissant à plusieurs unités de traitement différentes.

Compositions

Nous avons déjà mentionné l'importance que prend la composition du déchet dans un contexte de gestion intégrée. Ceci est particulièrement sensible dans le cas où des collectes sélectives sont implantées. En effet, le volume de déchet collecté par le biais d'une collecte sélective est proportionnel à la fraction que représentent les matériaux visés sur le volume total de déchet généré par les ménages. Inversement, le fait d'implanter une collecte sélective entraîne une modification plus ou moins importante, suivant le rendement de la collecte sélective, de la composition du flux de déchet collecté en collecte ordinaire. Pour rendre compte de ces phénomènes, nous avons ajouté à notre modèle de base une étape de calcul de la composition : dilution lorsque deux flux de même nature (mais

Tableau 1 : Unités de traitement prises en compte dans le modèle Multimise

Unités de production	Collectes	Unités de traitement	Exutoire	Autres
Zones géographiques	- Collecte sélective porte à porte - Collecte classique	- Centre de tri - Usine d'incinération - Plate-forme de compostage	Reprise matériaux milieu naturel	Trésorerie emprunt
Producteurs divers	- Collecte sélective par apport volontaire - Déchèterie - Transport	- Centre d'enfouissement technique de classe II - Centre d'enfouissement technique de classe I		

Tableau 2 : Exemples de calculs pour une usine d'incinération

Y	=	A	X	+	B
Mâchefers	=	Taux de cendre (déchet entrant) * 1.1	Tonnage entrant		
Refiom	=	Taux de refiom (procédé de traitement)	"		
Vapeur	=	2.7 10 ⁻⁴ * PCI (déchet entrant) * 0.75	"		
Coût +	=	Charges variables (caractéristiques de l'installation)	"	+	Charges fixes

Tableau 3 : Modes de calcul des flux dans Multimise

	Flux de matières	Flux financier
Absolu	Max(sortie + stock, consigne)	Consigne
Relatif	Consigne(%)*(stock+sortie)/100	Consigne(%)*sortie/100

de composition différente) s'ajoutent en entrée d'une unité de traitement, « distillation » lorsqu'un flux est extrait d'un autre flux (cas de la collecte sélective). Nous utilisons ces résultats pour calculer le PCI des flux de déchets à partir des PCI théoriques (ou mesurés) de leurs composants :

$$PCI_{\text{mélange}} = \sum_i x_i PCI_i$$

où x_i est la proportion massique du composant i et PCI_i et $PCI_{\text{mélange}}$ respectivement les pouvoirs calorifiques du composant i et du mélange.

Débit massique

Deux types de flux principaux ont été définis : les flux de matières, qui sont nécessairement positifs, et les flux financiers qui peuvent être positifs ou négatifs. Pour chaque unité, les flux sont prélevés sur la sortie de l'unité et sur les stocks constitués à l'étape précédente. Les débits massiques des flux peuvent être calculés suivant différents modes représentés dans le tableau 3.

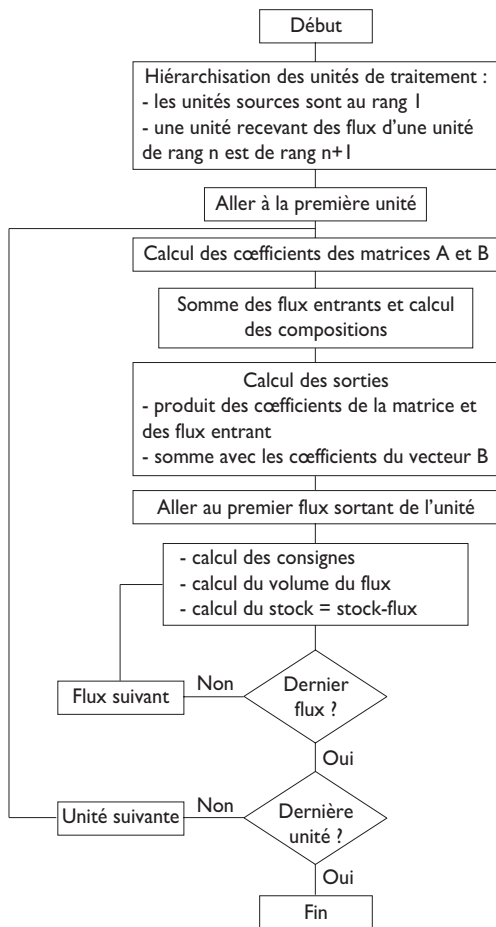


Figure 3 : Algorithme simplifié des calculs effectués à chaque pas de temps

Dans le cas d'une collecte sélective, qui vient prélever un flux d'un matériau donné sur le flux initial de déchets en mélange, la consigne est calculée en fonction de la fraction effective que représente le matériau dans le flux initial de déchets en mélange. Ainsi, un taux de collecte sélective de 10 % pour du papier carton, qui représente 25 % en masse du déchet brut, le taux effectivement appliqué pour calculer la masse de papier/carton collecté sera : 25%*10%=2,5% de la masse totale.

Algorithme de calcul des flux

Au sein de Multimise, les calculs suivent donc, à chaque pas de temps, un algorithme dont une version simplifiée est présentée en figure 3.

EXEMPLES DE RÉSULTATS, CAS D'UNE COMMUNAUTÉ DE

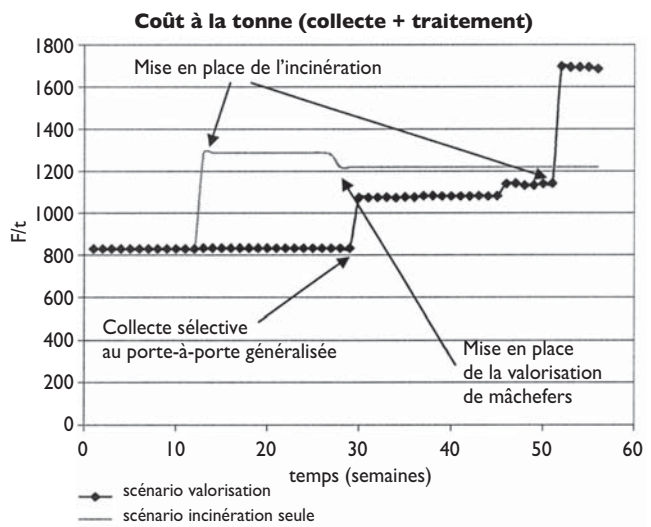


Figure 4 : Exemple de résultat obtenu avec Multimise: comparaison de deux scénarios de gestion intégrée sur une communauté de communes de la région Rhône-Alpes

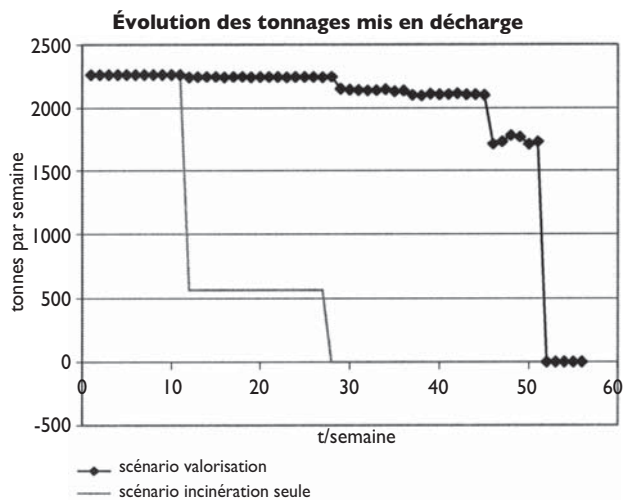


Figure 5 : évolution des tonnages pour les deux scénarios comparés

tant un total de 369000 habitants. Celle-ci s'est vu attribuer la compétence de traitement des déchets. À ce titre, elle a pris en charge l'évolution des équipements et des modes de gestion des déchets.

Ceci s'est traduit par la mise en place de collectes sélectives en porte à porte sur les communes urbaines et par la construction d'un centre de tri. Dans les années qui viennent la région devrait se doter d'un incinérateur, conformément au plan départemental de gestion des ordures ménagères. Nous avons testé le simulateur *Multimise* en utilisant les données de la communauté de communes pour comparer deux scénarios de gestion : un scénario privilégiant l'incinération et un scénario maximisant le recyclage. Les résultats obtenus montrent l'intérêt de la simulation, même s'ils doivent être manipulés avec prudence, compte tenu des hypothèses qu'il a été nécessaire de poser et du caractère extrême de ces deux scénarios. En particulier, dans le scénario favorisant la valorisation, nous avons simulé l'implantation d'une collecte sélective au porte à porte sur l'ensemble de la communauté de communes. Ceci se traduit par des coûts de collecte nettement plus élevés que ce que l'on obtiendrait dans la pratique en privilégiant une collecte par apport volontaire sur des zones d'habitat dispersé.

CONCLUSION

Nous avons développé un simulateur de collecte et de gestion de déchets s'appuyant sur un modèle modulaire et adaptatif permettant d'intégrer des modèles variés d'unités de traitement. Les premiers résultats de simulation obtenus avec cet outil montrent l'intérêt d'un tel modèle qui permet de comparer différents scénarios et de visualiser leur déploiement dans le temps. La qualité des simulations reste cependant dépendante de la qualité des modèles des unités de traitement incorporés à l'outil. Ceux qui sont utilisés actuellement sont issus de la littérature. Nous envisageons de compléter cette base initiale par une base de données représentative d'unités existantes ou théoriques et de diversifier la nature des flux pris en compte afin d'élargir les possibilités d'utilisation de notre modèle.

*Bruno Debray

ENSM-SE, Centre SITE - 158 cours Fauriel - 42023 Saint-Étienne CEDEX 2
debray@emse.fr

Références

- [1] Ademe : www.ademe.fr/collectivites/Déchets/coûts/Étude-complète/menu.htm, *Analyse des coûts de gestion des déchets municipaux Ademe AMF Sofres Conseil*, version 1.0 du 5 avril 2000
- [2] Legoux Jean-Yves, Le Douce Catherine, *L'incinération des déchets ménagers*, Economica, 1995, 226 p.
- [3] Ademe, *Guide du centre de tri des déchets recyclables ménagers (1998)*. Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie, Paris, 140 p.
- [4] Le Bozec A. (1994). *Le service d'élimination des ordures ménagères*. l'har-mattan, Paris, 460 p.
- [5] G. Coutte : *modélisation de la gestion des déchets ménagers*, mémoire de DEA, École nationale supérieure des mines, juillet 2000, 61 p.
- [6] B.Debray, G.Coutte, P. Davoine, *Simulating Household Waste Management : A Pedagogical Tool Applied To Decision Support For Urban Communities*, ISWA world congress 2000, Paris, July 2000, editeur AGHTM, CD-ROM non paginé.
- [7] S. Wenisch : *Contribution à l'élaboration de l'analyse du cycle de vie de la chaîne de traitement par incinération*, Thèse de doctorat, Insa de Lyon, Juin 1999, N° d'ordre 99ISAL0005, 255 p.