



**HAL**  
open science

# La valorisation des déchets solides municipaux aux Etats-Unis (deuxième thèse)

Samuel Elmaleh

► **To cite this version:**

Samuel Elmaleh. La valorisation des déchets solides municipaux aux Etats-Unis (deuxième thèse). Génie des procédés. Université de Nancy 1, 1973. Français. NNT: . tel-01143114

**HAL Id: tel-01143114**

**<https://hal.science/tel-01143114>**

Submitted on 16 Apr 2015

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Deuxième Thèse

LA VALORISATION DES DECHETS  
SOLIDES MUNICIPAUX AUX ETATS-UNIS

*par*

Samuel ELMALEH

*Ingénieur des Industries Chimiques*

*Soutenue publiquement le 19/10/73  
devant la Commission d'Examen*

JURY :

MM. P. LE GOFF, *Président*

R. BEN AIM, *Examineur*

J. BORDET, *Examineur*

M. TAMALET, *Invité*



ppn = 170 840 28X  
MH = 395 844

UNIVERSITÉ DE NANCY I

628.445 ELM:

U.E.R. DE P.C.B.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE  
DES MINES DE SAINT-ETIENNE  
Bibliothèque du Centre SPIN

Deuxième Thèse

LA VALORISATION DES DECHETS  
SOLIDES MUNICIPAUX AUX ETATS-UNIS

par

Samuel ELMALEH

Ingénieur des Industries Chimiques



*Soutenue publiquement le  
devant la Commission d'Examen*

JURY :

MM. P. LE GOFF, *Président*

R. BEN AIM, *Examineur*

J. BORDET, *Examineur*

M. TAMALET, *Invité*

Ce travail est, pour une grande part, la synthèse d'un voyage d'études effectué aux Etats-Unis sur le thème : "Les investissements nécessités par la lutte contre la pollution".

Nous n'avons pu accomplir cette enquête que grâce à l'aide matérielle qui nous a été fournie par Monsieur le Professeur COINDE, Directeur du Département Gestion de l'Ecole des Mines de Saint-Etienne, ainsi que par les élèves de l'option Gestion.

Nous tenons à leur présenter ici nos plus vifs remerciements, particulièrement à Monsieur ROSSI. Qu'à travers eux soient remerciées les entreprises qui ont bien voulu nous subventionner.

Nous tenons à assurer de notre reconnaissance tous ceux qui aux Etats-Unis nous ont accueillis, ont répondu à nos questions et fourni une abondante documentation, particulièrement les services de l'E.P.A. de New-York et Philadelphie, le Bureau of Mines à Washington, le National Center for Resource Recoveres à Washington.

Les informations et les conclusions les plus pertinentes contenues dans cette étude nous ont été suggérées au cours des passionnants débats que nous avons tenus avec les représentants de ces organismes.

LA VALORISATION DES DECHETS SOLIDES  
MUNICIPAUX AUX ETATS-UNIS

S O M M A I R E

INTRODUCTION .....	1
<u>Chap. I</u> : LE COMPOSTAGE .....	4
I - Les procédés de compostage .....	5
II - Applications du compostage .....	6
<u>Chap. II</u> : LA RECUPERATION DE L'ENERGIE CALORIFIQUE .....	9
I - L'incinération des déchets et la production de vapeur aux Etats-Unis .....	10
II - Pratique et économie de l'incinération aux Etats-Unis .....	11
A. Pratique de l'incinération .....	11
B. Investissements nécessaires avec ou sans récupération de la chaleur .....	12
C. Economie de la récupération de la chaleur .....	14
<u>Chap. III</u> : LA CONVERSION CHIMIQUE .....	15
I - La pyrolyse .....	15
A. Principe .....	15
B. Applications courantes de la pyrolyse aux déchets solides .....	16
II - L'hydrolyse .....	19
III - La production d'éthanol à partir des déchets municipaux .....	19
IV - La production de protéines à partir des déchets solides .....	21
A. Conversion des résidus de papier en protéines .....	21
B. Evaluation d'un procédé de préparation de levure sur les déchets solides .....	21
V - Autres méthodes chimiques de conversion des déchets solides .....	24

<u>Chap. IV</u> : LA RECUPERATION DES MATIERES PREMIERES .....	25
I - Emballages métalliques .....	25
A. Technologie de l'utilisation des emballages métalliques récupérés .....	25
B. La récupération .....	27
II - Le papier .....	29
III - Le verre .....	31
IV - Les plastiques .....	32
V - Le caoutchouc .....	33
VI - Les déchets textiles .....	34
VII - Les résidus d'incinération .....	34
CONCLUSIONS .....	36
I - Le recyclage et la transformation .....	36
II - Que faut-il rechercher ? .....	37
III - Economie de la valorisation .....	37
BIBLIOGRAPHIE .....	39

## INTRODUCTION

Que faire des 136 milliards de tonnes (1) de déchets solides produits annuellement aux Etats-Unis ?

Le Solid Waste Disposal Act de 1965, amendé en 1970, prévoit que le but final assigné à la technologie est la récupération intégrale des matières et de l'énergie contenue dans les résidus solides.

Cette détermination résulte de plusieurs facteurs. L'un des plus importants est peut-être l'inadaptation des procédés classiques d'agencement des déchets. Les terrains favorables aux champs d'épandage près des centres urbains deviennent de plus en plus rares et de plus en plus coûteux. Brûler les déchets en plein air apporte une contribution non négligeable à la pollution atmosphérique.

Les décharges sont interdites dans la majorité des centres urbains à cause des dangers de contamination qu'elles présentent, de considérations esthétiques, du risque de prolifération des insectes et de pollution de l'eau. L'incinération, telle qu'elle est traditionnellement pratiquée, est économiquement prohibée à cause des équipements coûteux de contrôle de la pollution de l'air qu'elle exige.

De plus, les déchets solides sont souvent des ressources déguisées en nuisances. Par exemple, 12 millions de tonnes d'acier (1), principalement sous forme de boîtes de conserve, sont perdues chaque année dans les champs d'épandage. Les résidus ne sont cependant des ressources exploitables que dans la mesure où les procédés de récupération possèdent un potentiel économique suffisant. Ce dernier doit être évalué avec beaucoup de prudence ; en effet, les investissements, les revenus, le marché ne sont pas seuls à être en cause. Il faut considérer les avantages d'une diminution de la pollution de l'environnement, des risques encourus par la santé publique ainsi que les problèmes liés aux procédés classiques d'agencement des ordures.

Une difficulté à laquelle se heurte la technologie de la récupération est l'hétérogénéité des échantillons de déchets selon leur provenance, situation géographique, climat, saison et caractères socio-économiques de la population qui les fournit (2, 3). Dans toute la suite, il s'agira de déchets solides municipaux définis comme l'ensemble des résidus urbains qui ne sont pas contenus dans l'air ou l'eau.

Des données en provenance de sources diverses (2 à 8) permettent d'estimer de façon raisonnable la composition des déchets municipaux (tableau 1).

Tableau 1

Composant	Composition pondérale (produit sec)	
	Bornes	Composition nominale estimée par l'Institut BATTELLE
Papier	37-60	55
Journal	7-15	12
Carton	4-18	11
Autres	26-37	32
Métaux	7-10	9
Ferreux	6-8	7,5
Non ferreux	1-2	1,5
Aliments	12-18	14
Poussières	4-10	5
Bois	1-4	4
Verre	6-12	9
Plastiques	1-3	1
Divers	< 5	3
		100
Humidité : 20-40 % soit 30 % environ		

Notre étude a pour but de définir la technologie, l'économie et le potentiel futur de la récupération et de l'utilisation des déchets municipaux.

Avant d'être transformées ou récupérées, les matières contenues dans les résidus doivent être séparées après réduction du volume des déchets. Une étude économique de leur valorisation est liée aux problèmes technologiques soulevés par la diminution de leur taille et la séparation des matières. Nous ne les considérerons pas ici. Nous allons simplement explorer les différentes voies offertes à la valorisation :

- compostage
- récupération de l'énergie calorifique
- conversion chimique
- récupération des matières premières

LE COMPOSTAGE

Le compostage est la dégradation biochimique de matériaux organiques en une substance semblable à l'humus. Des conditions aérobies sont essentielles afin de limiter les émanations d'odeurs désagréables et de permettre une cinétique suffisamment rapide donc économique. Par suite des difficultés de séparation des matériaux, une quantité appréciable de composés non biodégradables traversent les unités de digestion sans être transformée (9).

Le compost est caractérisé par sa richesse en carbone et en azote. La teneur en carbone, déterminée par la méthode PALE, varie entre 5 et 30 % par rapport au produit sec avec une moyenne de 15 %. L'azote KJELDAHL est généralement compris entre 0,3 et 1,5 % avec une moyenne de 0,8 %.

Les composts sont des produits présentant en moyenne les caractéristiques suivantes :

- criblage : 90 % du compost doit passer à la maille de 35 mm,
- carbone : teneur supérieure à 5 % sur matière sèche,
- azote : teneur supérieure à 0,3 % sur matière sèche,
- rapport C/N : compris entre 10 et 25 (à l'exception des composts destinés à la confection de couches chaudes où ce rapport peut être supérieur à 25).

Le compost est essentiellement utilisé comme conditionneur des sols.

En effet, ce produit :

- améliore la structure du sol (10),
- augmente le pouvoir de rétention en humidité,
- réduit le lessivage des composés solubles de l'azote,
- active le phosphore dans son action sur la croissance de plantes,
- facilite le maintien d'une acidité constante du sol.

Il faut remarquer que le compost n'est pas un fertilisateur. En effet, il ne contient au plus que 1 % d'azote, de phosphore ou de potassium (1). Le produit

ne dispose ainsi que d'un marché limité et l'économie du compostage souffre de la concurrence de la tourbe. En 1966, 600 000 tonnes ont été consommées aux Etats-Unis (11). Une ville de 800 000 habitants produirait les déchets solides nécessaires à la fabrication de ce compost pendant une année.

En fait, le potentiel économique du compost doit être évalué en fonction d'éventuelles utilisations comme base dans la fabrication d'engrais chimiques. En négligeant cette possibilité, on a compromis, dans de nombreux cas, l'avenir du compostage aux Etats-Unis (1).

La plupart des unités de compostage sont associées à des unités de récupération de matériaux tels que boîtes de conserve, papier journal, textile et verre ; de plus, elles sont liées par contrat aux municipalités desquelles sont perçus 3 ou 4 dollars par tonne de résidus à traiter (1).

Après avoir défini quelques aspects technologiques du compostage, nous verrons quelques applications récentes de cette méthode d'agencement des déchets.

## I - LES PROCÉDES DE COMPOSTAGE

De nombreux travaux ont été récemment publiés sur les techniques de compostage (13, 14) et nous ne nous attarderons guère sur ces problèmes.

La plupart des procédés américains relèvent de deux catégories qui dépendent du type de digestion employé.

Le premier type, qui est aussi le plus courant, repose sur une digestion mécanique à l'intérieur d'un réservoir pendant cinq jours environ. Les déchets sont agités et on introduit de l'air pour maintenir des conditions aérobies (14).

Dans la seconde catégorie de procédés, inspirés des méthodes européennes, on entasse les résidus dans de longs silos pendant plusieurs semaines. Les matériaux sont agités une ou deux fois par semaine. Après digestion, le compost est "cuvé" dans des silos pendant deux ou trois semaines supplémentaires. Le mécanisme réel de cette "cuve" n'est pas bien connu ; on pense cependant que les chaînes celluliques les plus résistantes sont cassées par ce traitement (14).

La digestion mécanique semble être la méthode la plus prometteuse, particulièrement dans le cas des grandes unités de compostage près des centres urbains.

## II - APPLICATIONS DU COMPOSTAGE

Entre 1967 et 1966, six compagnies ont construit des unités de compostage à grande échelle ; chacune de ces sociétés a mis au point un procédé différent dont les caractéristiques sont consignées dans le tableau 2.

Tableau 2

Procédé	Lieu	Date de mise en fonctionnement	Capacité t/j de déchets	Observations
Metropolitan Waste Conversion Corporation (Metro)	Houston, Texas	janvier 1967	360	Le matériau est agité pendant la digestion qui dure 5 jours. Les résidus de verre sont éliminés du produit fini.
International Disposal Corporation (I.D.C.)	St-Petersburg, Floride	juillet 1966	105	Cinq convoyeurs en série permettent de brasser le compost en formation dans l'unité de digestion. Un ventilateur fournit l'air nécessaire. Ce procédé présente des problèmes d'odeur (15).
Fairfield Hardey	Altoena, Pennsylvanie		25	Le matériau entre dans l'unité de digestion par la partie supérieure de celle-ci et est distribuée par la force centrifuge d'un cylindre tournant à grande vitesse.
John R. Snell	Houston, Texas	janvier 1967	300	Système hybride du procédé Metro et Fairfield Hardey.
Orvendler Crusher and Pulverizer Co	Mobile, Alabama	1966	300	Digestion en silos.
The U.S. Public Health Service Tennessee Valley Authority	Johnson City, Tennessee	juin 1967	50	Digestion en silos.

Une estimation des coûts en capital, énergie et travail humain est présentée pour les différents procédés dans les tableaux 3 à 6.

Tableau 3 : Procédé Metro (16)

Capacité tonnes/jour	Capital milliers de dollars	Puissance chevaux-vapeur	Travailleurs nécessaires
100	900	1 250	12
150	1 250	1 100	
200	1 200	1 700	17
300	1 500	1 900	25
360	1 700		
400	1 600	2 000	30

Tableau 4 : Procédé I.D.C. (16)

Capacité tonnes/jour	Capital milliers de dollars	Puissance chevaux-vapeur	Travailleurs nécessaires
100	1 400	600	20
105	1 500		
200	2 100	800	28
300	2 700	950	36
400	3 200	1 100	45

Tableau 5 : Procédé FAIRFIELD HARDY (17)

Capacité tonnes/jour	Capital milliers de dollars	Puissance chevaux-vapeur	Travailleurs nécessaires
100	1 370	930	11
200	2 000	1 590	18
300	2 510	1 830	25
400	3 210	2 560	30

Tableau 6 : Procédé John R. SNELL (18)

Capacité tonnes/jour	Capital milliers de dollars	Amortissement des charges fixes dollars	Gestion et maintenance dollars	Total
100	540	1,52	1,92	3,44
200	960	1,35	1,68	3,03
300	1 350	1,27	1,56	2,93
400	776	1,25	1,44	2,69

L'examen de ces tableaux révèle que les capitaux nécessaires aux procédés I.D.C. et Fairfield Hardy atteignent près du double des investissements requis par les procédés Metro et Snell. Il est difficile de déterminer les causes de ces différences. Cependant, le coût élevé du système I.D.C. est dû à la très grande unité de digestion requise.

L'analyse de ces données doit être très prudente car elles découlent souvent d'estimations.

Bien que l'utilisation de compost ait été un succès dans de nombreux pays, les résultats aux Etats-Unis n'ont guère été encourageants pour des considérations économiques. Les Américains ont, pendant longtemps, raisonné en terme de rentabilité, de sorte que de nombreuses unités de compostage ont dû fermer ou travailler à l'aide de subventions (14).

LA RECUPERATION DE  
L'ENERGIE CALORIFIQUE

La récupération de la chaleur dégagée dans les incinérateurs d'ordure a été mise en valeur par les récentes réalisations en Europe, particulièrement en Allemagne.

Deux procédés sont généralement employés pour produire de la vapeur à partir de la combustion des déchets. Dans le premier type, un four réfractaire conventionnel est équipé d'une chaudière. Le second type, le plus utilisé en Europe, emploie un four le long des parois duquel on fait ruisseler de l'eau : un tel équipement possède des coefficients de transfert de chaleur plus élevés. La température du four est ainsi maintenue dans des limites raisonnables, ce qui ne serait guère possible dans un four classique sans d'importants excès d'air. Le four à ruissellement pose ainsi des problèmes de pollution atmosphérique moins graves. En effet, les fours conventionnels sont conçus pour fonctionner avec un excès d'air de 150 à 200 % alors que les fours à ruissellement opèrent efficacement avec seulement 50 à 60 % d'excès d'air.

La réduction de l'excès d'air dans les fours à ruissellement implique une consommation moindre en gaz combustible et, partant, un équipement plus petit. Les désavantages de ce type de fours sont des coûts d'investissement et de fonctionnement légèrement plus élevés que pour le procédé classique. Une seule application des fours à ruissellement existe à l'heure actuelle aux Etats-Unis.

Dans les deux systèmes, un appoint en combustible est nécessaire afin de maintenir constante la production de vapeur malgré l'humidité des déchets et les autres variables gouvernant le pouvoir calorifique des résidus. En Europe, on utilise du charbon pulvérulent, le gaz ou le fuel sont mieux adaptés aux installations américaines.

Signalons qu'une autre forme de récupération de l'énergie calorifique est à l'étude dans le Connecticut et en Californie, à savoir la production d'énergie par utilisation de turbines à gaz alimentées par les effluents gazeux quittant les incinérateurs municipaux (19, 20).

## I - L'INCINERATION DES DECHETS ET LA PRODUCTION DE VAPEUR AUX ETATS-UNIS

La récupération de l'énergie calorifique contenue dans les déchets solides a été jusqu'à maintenant relativement limitée aux Etats-Unis. Dans certains centres urbains, cette solution a été abandonnée après quelques essais.

Le tableau 6 présente succinctement les installations actuellement en fonctionnement.

Tableau 6

Situation géographique	Capacité d'incinération t/j	Investissements dollars (1968)	Prix de revient de la vapeur dollar/1000 lb	Prix de vente de la vapeur dollar/1000 lb	Références
Atlanta, Géorgie	700	4 567 000		0,20	(1,21,22)
Chicago, Illinois	300	6 825 000	0,5	0,625	(21,23)
Miami, Floride	900	3 000 000		0,70	(24)
Hempstead, Long Island, New York	750	6 000 000			(25,26)
U.S. Naval Station, Norfolk, Virginie		2 200 000			(27,28,29)
Houston, Texas	330	500 000			(30)

Les expériences entreprises à Hempstead ainsi qu'à la base navale de Norfolk sont particulièrement intéressantes.

En effet, la chaleur produite par l'incinérateur de Hempstead est utilisée dans la production de vapeur et dans le dessalement de l'eau de mer.

L'incinérateur de Norfolk est équipé du premier four à ruissellement en fonctionnement aux Etats-Unis. Les caractéristiques de l'installation sont présentées sur le tableau 7.

Tableau 7

Caractéristiques des chaudières  
en fonctionnement à la base navale  
de Norfolk, Virginie (29)

Déchets traités	180 t/jour
Pouvoir calorifique	5 000 BTU/lb
Humidité	25 %
Non combustibles	12,5 %
Production de vapeur	
avec des déchets humides	50 000 lb/h
avec des déchets séchés	
ou avec un appoint en combustible	60 000 lb/h

II - PRATIQUE ET ECONOMIE DE L'INCINERATION AUX ETATS-UNIS

A - Pratique de l'incinération

Les unités d'incinération à grande échelle n'ont été opérationnelles que récemment de sorte que les données décisives sont encore difficiles à obtenir. Certaines relations gouvernant la conception d'installations récentes ont été publiées. Cependant, il faut noter que ces informations n'ont pas toujours été confirmées à l'échelle industrielle.

Dans une description de l'unité de Norfolk, MOORE (29) prévoit que la production de vapeur est une fonction du pouvoir calorifique des déchets, de la charge en solide et de l'excès d'air (fig. 1 à 3).

Des données similaires ont été présentées dans un article relatif à l'expérience européenne dans lequel on insistait sur la possibilité d'appliquer ce savoir aux problèmes américains (31). En admettant un excès d'air de 88 %,

l'auteur a évalué la production de vapeur. Ses résultats peuvent être comparés à ceux de l'unité de Norfolk qui utilise 50 % d'excès d'air (fig. 4). Une légère production légèrement supérieure résulte du moindre excès d'air.

La Société Day & Zimmermann Association de Philadelphie ont fait pour le District de Columbia, des estimations sur la récupération de la chaleur à partir d'incinérateur de 800 tonnes/jour (32). Leurs études ont porté sur les domaines suivants :

- four réfractaire conventionnel avec refroidissement du gaz de combustion par pulvérisation (système A),
- four réfractaire conventionnel avec refroidissement du gaz de combustion par pulvérisation et chaudière en dérivation (système B),
- four à ruissellement avec chaudière par convection (système C),
- four à ruissellement avec refroidissement du gaz de combustion par pulvérisation (système D),

Leur rapport a présenté une estimation de la production de vapeur en fonction de l'excès d'air et de l'humidité des déchets.

## B - Investissements nécessaires avec ou sans récupération de la chaleur

DAY & ZIMMERMANN ont présenté des estimations sur les investissements nécessaires aux systèmes étudiés (32). Ces coûts sont relatifs aux éléments pouvant varier d'une installation à l'autre, c'est-à-dire que l'on exclut de l'étude l'infrastructure générale. Cette dernière a d'ailleurs été estimée par BATTELLE entre 100 000 et 200 000 dollars.

Les estimations de DAY & ZIMMERMANN sont résumées dans le tableau 8. Elles peuvent être comparées aux données publiées sur les fours réfractaires conventionnels sans récupération de chaleur (tableau 9).

Tableau 8

Estimation des investissements  
nécessaires à un incinérateur municipal  
de 800 tonnes/jour avec récupération de la chaleur

Systeme	Capital variable \$ (32)	Capital constant \$ (BATTELLE)	Capital total \$
A	3 583 000	150 000	3 733 000
B	5 737 000	150 000	5 887 000
C	4 297 000	150 000	4 447 000
D	4 303 000	150 000	4 453 000

Tableau 9

Investissements nécessaires  
pour des incinérateurs réfractaires  
conventionnels (33, 34)

Installation	Capacité t/j	Investissements dollars
Alexandrea, Virginie	200	1 100 000
Lexington, Kentucky	200	900 000
Evanston, Illinois	180	1 060 000
Waumetosa, Wisconsin	165	1 000 000
Portsmouth, Virginie	300	1 170 000
Buffalo, New York	400	2 400 000
Baltimore, Maryland	800	3 350 000
Cincinnati, Ohio	500	2 330 000
Hartford, Connecticut	600	2 240 000
Rochester, New York	600	3 100 000

On peut se servir des estimations de DAY & ZIMMERMANN pour construire des fonctions basées sur l'hypothèse généralement admise que le coût est proportionnel à la puissance 0,6 de la capacité (fig. 5). Les données déjà présentées montrent qu'il existe des corrélations raisonnables pour les installations à ruissellement. L'extrapolation des résultats de DAY & ZIMMERMANN pour les fours conventionnels sans récupération de chaleur indique une tendance vers des coûts plus élevés que pour les installations existantes. On peut attribuer cela aux équipements contre la pollution de l'air qui sont plus coûteux et nécessaires sur les incinérateurs modernes.

### C - Economie de la récupération de la chaleur

Les données relatives à la production de vapeur sont très limitées. Notons que l'investissement additionnel pour produire de la vapeur à l'incinérateur de Chicago serait de 0,50 dollar pour 1 000 lb.

Pour évaluer l'implication de ces coûts, nous admettrons que l'on produit 2 lb de vapeur pour 1 lb de déchet, le coût additionnel étant de 0,5 dollar pour 1 000 lb. La vapeur produite doit être vendue au moins à 0,5 dollar pour 1 000 lb. Or, on ne justifie la récupération de la chaleur que si la vapeur est vendue à profit. Si celle-ci est vendue à 0,6 dollar pour 1 000 lb, le bénéfice serait de 0,10 dollar sur 1 000 lb. Le taux de production envisagé conduit à 4 000 lb de vapeur par tonne de déchets ou encore à un gain de 0,4 dollar par tonne. Dans le cas de l'incinérateur de Chicago où la vapeur est vendue 0,625 dollar/1 000 lb (tableau 6), le revenu net est de 0,5 dollar par tonne de déchets.

Il apparaît donc que seulement 10 % du coût de l'incinération peut être récupéré par la vente de vapeur, encore faut-il disposer d'une clientèle potentielle. DAY & ZIMMERMANN en concluent que la récupération de la chaleur ne se justifie pas.

Le contrôle de la pollution de l'air est également un facteur restrictif qui rend l'incinération de plus en plus onéreuse. Remarquons, en particulier, que la plupart des incinérateurs de l'Etat de New York ont dû cesser leurs activités au cours de ces dernières années.

LA CONVERSION CHIMIQUE

De nombreuses opérations tendant à valoriser les déchets municipaux peuvent être groupées sous l'appellation "*conversion chimique*". Ce terme comprend en fait les procédés thermiques, chimiques et biologiques pour le traitement des résidus non séparés. Nous ne nous occuperons pas dans ce chapitre des procédés chimiques visant à récupérer une fraction spécifique des déchets tels que les résidus métalliques, produire des fibres secondaires, régénérer le verre, etc...

Nous étudierons successivement :

- la pyrolyse,
- l'hydrolyse,
- les procédés biochimiques.

I - LA PYROLYSE

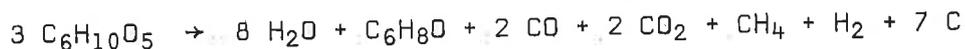
A - Principe

La pyrolyse est un procédé où la matière organique est portée à haute température (500 à 1 000°C) dans une atmosphère pauvre en oxygène ou exempte de ce gaz. C'est une opération endothermique.

La température élevée et l'absence d'oxygène produisent une décomposition des matières organiques en trois groupes :

- 1) un gaz composé essentiellement d'hydrogène, méthane, monoxyde et dioxyde de carbone,
- 2) un goudron liquide à la température ordinaire comprenant des composés tels que l'éthanoïque, l'acétone, le méthanol,
- 3) un produit solide consistant en carbone presque pur et en quelques inertes (verre, métal, sable).

La cellulose, qui est un des principaux composés organiques des résidus solides, se pyrolyse selon la réaction (35) :



Le groupe  $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}$  représente la famille de liquides obtenus au cours de la pyrolyse.

La présence de nombreuses variétés organiques affecte le rendement de l'opération. Des expériences montrent que la décomposition dépend fortement de la température (36), ce qui suggère une compétition entre plusieurs réactions parallèles.

## B - Applications courantes de la pyrolyse aux déchets solides

Les applications de la pyrolyse au traitement des déchets solides sont encore quelque peu limitées.

Un article de PORTEOUS évalue les possibilités de préparer l'acétone, l'éthanoïque, du charbon et autres produits commercialisables (37). Des pyrolyses à échelle du laboratoire ont été effectuées à l'Université de New York et par le Utilities Department of the City of San Diego (36, 37, 38).

Deux unités à l'échelle pilote sont également en fonctionnement. La première de ces installations appartient à Cameron-Yakima, Inc. à Yakima, Washington (39), la seconde à Waste Conversion Systems Division of Pan American Resources, Inc. située à Albuquerque, Nouveau Mexique.

L'unité de Cameron-Yakima n'a pu traiter que des déchets synthétiques et non des résidus municipaux. Le convertisseur LANTZ de Pan American Resources est, semble-t-il, le seul système à pyrolyse conçu et testé pour des déchets municipaux.

On constate une grande disparité entre les résultats obtenus par les divers systèmes ; ceux de PORTEOUS sont très défavorables, le convertisseur LANTZ présentant au contraire des performances très encourageantes.

Estimation des coûts du traitement par pyrolyse : Une analyse des coûts est fournie par PORTEOUS (37). Dans son procédé, après séchage, les déchets sont pyrolysés ; les gaz non condensables sont brûlés pour le chauffage du système, le résidu est refroidi, comprimé et vendu. Le condensat est séparé en fractions lourde et légère. La fraction lourde est distribuée pour donner du créosote et des dérivés phénolés ou bien elle est brûlée pour produire de la chaleur. L'acide acétique est extrait des huiles dans la phase vapeur de la fraction légère à l'aide d'un solvant à point d'ébullition élevé ; il est ensuite séparé par distillation sous vide ; le produit obtenu est commercialisable (fig. 6).

Les tableaux 10 et 11 présentent les coûts de l'opération et les revenus qu'on peut espérer.

Tableau 10

Estimation des revenus à espérer  
d'une pyrolyse (37)

Composé	Rendement %	Tonnes/jour	Prix cent/lb	Revenus dollars/j
Acétone	0,3	0,45	6,5	57
Acide acétique	3,1	4,65	9	835
Goudrons	7	10,5	1	360
Huiles	5	7,5	1	360
Charbon	25	37,5	7 \$/t	260
				<u>1,512 \$</u>

Tableau 11

Estimation des coûts (37)

	\$
Coût de l'unité .....	8 000 000
Charges fixes à 0,1030 .....	824 000
Travail, 12 hommes à 7 000 \$ .....	84 000
4 hommes à 9 000 \$ .....	36 000
Maintenance (2 % investissement) .....	190 000
Agencement de 149 t/j de déchets .....	245 000
à 4,50 \$/t	
Coût total .....	1 065 000
Revenu à 1,521 \$/j .....	550 000
	<hr/>
Prix annuel net .....	515 000

*Prix du traitement d'une tonne de déchets... 5,66*

Une étude du Cities Service Corp. estime l'investissement à 16 millions de dollars pour équiper une unité de 5 000 t/j, soit 3 200 dollars par tonne traitée quotidiennement. Quand on ajoute les dépenses de démarrage, on obtient un investissement de 6 500 dollars par tonne quotidienne.

GARRETT RESEARCH and DEVELOPMENT Co a estimé en 1971 l'investissement nécessaire à une petite unité de 2 000 tonnes/jour à 11,5 millions de dollars, soit 5,75 dollars par tonne quotidienne (1971).

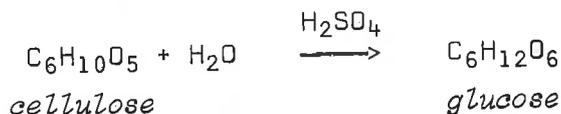
Le Bureau of Mines estime le coût d'opération à 2 dollars par tonne pour une unité de 2 500 t/j.

Le traitement des déchets par pyrolyse nécessite donc des investissements élevés comparables à ceux de l'incinération. C'est cependant, une technique très prometteuse par la variété des produits qu'elle permet d'obtenir sans risque de pollution atmosphérique.

## II - L'HYDROLYSE

L'hydrolyse de la cellulose est une des plus intéressantes réactions chimiques pour le traitement des déchets solides.

La réaction peut s'écrire :



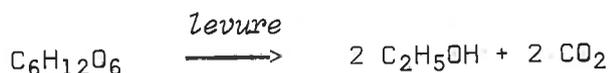
L'acide sulfurique dilué (0,5 %) joue ici le rôle d'un catalyseur. De nombreux autres sucres sont formés comme sous-produits et de nombreux efforts ont été accomplis pour limiter ces réactions partielles.

Cette réaction servait jadis à préparer le sucre à partir du bois pour le procédé Madison. Des procédés plus avantageux ont été mis au point. Cependant, dans le cas des déchets, l'hydrolyse a une base économique plus favorable eu égard au caractère négatif d'une grande partie des résidus.

L'hydrolyse de la cellulose conduit à une solution diluée de glucose de peu de valeur relativement aux autres procédés. Dans le procédé Madison, par exemple, on neutralise l'acide puis on provoque la fermentation de la liqueur pour produire de l'éthanol. On peut également provoquer une activité biologique dans la solution sucrée sous des conditions aérobies pour faciliter la digestion au sucre, ce qui entraîne l'augmentation de la population dans la levure. Ce dernier procédé permet de préparer des protéines pour les nourritures des animaux. Il est donc nécessaire de discuter le potentiel économique de l'hydrolyse en relation avec les procédés qui traitent la liqueur sucrée.

## III - LA PRODUCTION D'ETHANOL A PARTIR DES DECHETS MUNICIPAUX

La préparation d'éthanol à partir des déchets solides passe par l'hydrolyse de ces résidus. La fermentation du glucose obtenu permet de produire l'alcool :



Des réactions parasites peuvent avoir lieu ; c'est pourquoi les conditions de fermentation (température, pH) doivent être sévèrement contrôlées.

A partir du procédé Madison et de certaines considérations sur la chimie de la cellulose, PORTEOUS a conçu un procédé pour hydrolyser les déchets municipaux, puis pour produire l'éthanol par fermentation (37).

Dans ce procédé, les déchets sont pulvérisés et séparés par flottation dans l'eau. La fraction dense est destinée aux champs d'épandage, la fraction légère contient la cellulose en unité (fig. 7).

Une analyse des coûts basée sur une concentration en cellulose de 60 % dans le matériau brut a été réalisée par PORTEOUS et légèrement révisée par BATTELLE (tableau 12) pour une unité traitant 249 tonnes/jour.

Tableau 12

Analyse économique de la production d'éthanol  
à partir de déchets solides  
contenant 60 % de cellulose (37)

	\$
Coût de l'installation .....	2 262 000
Coûts annuels	
Charges fixes .....	233 000
Maintenance .....	110 000
Coût en matériel .....	305 000
(énergie comprise)	
Travail .....	156 000
Agencement de 176 tonnes/j de résidus .....	280 000
Réduction de 23 500 lb/j de D.B.O. ....	258 000
	<hr/>
Coût total par an .....	1 340 000
Revenus annuels	
3,93 x 10 <sup>6</sup> gallons d'éthanol à 40 cents/gal .....	1 570 000
Profit annuel .....	230 000
Profit par t de déchets ..	2,50

Le tableau 12 montre qu'on peut espérer un profit de 2,50 dollars par tonne de déchets. L'économie est plus favorable que dans tout autre procédé.

Il faut remarquer que la production d'alcool à partir du bois a dû cesser en 1947. Cette production a, de plus, été marginale. Il serait recommandé de poursuivre l'étude économique de ce procédé d'agencement des déchets solides ; si les résultats sont encore favorables, on construira une unité pilote de fabrication d'éthanol (40).

#### IV - LA PRODUCTION DE PROTEINES A PARTIR DES DECHETS SOLIDES

##### A - Conversion des résidus de papier en protéines

Le Denver Research Institute étudie la conversion de résidus de papier en protéines en utilisant un micro-organisme capable de dégrader rapidement la cellulose avec un haut rendement protéinique. La fermentation a lieu dans de l'eau enrichie par des hydrocarbures, de l'oxygène et de l'azote. Les protéines résultantes serviraient à la nourriture des animaux domestiques.

##### B - Evaluation d'un procédé de préparation de levure sur des déchets solides

Un rapport a été préparé par Ionics, Inc. sur l'évaluation d'une unité d'hydrolyse - fermentation produisant des levures (40).

L'hydrolyse comporte quatre étapes :

- hydrolyse,
- flash vaporisation,
- neutralisation,
- centrifugation.

Les réacteurs sont disposés en série et le procédé peut fonctionner en continu.

Quatre matériaux bruts ont été considérés :

- déchets de papier divers,
- papiers d'emballage,

- déchets urbains organiques,
- déchets urbains mélangés.

Le tableau 13 présente les coûts de production en fonction de la capacité de l'installation et du matériau traité.

Tableau 13

Coûts de production en cents par livre de sucre  
(unité à 3 étages)

Matériau	Prix par tonne	Capacité de l'unité (tonnes/j)				
		80	150	300	500	1 000
Déchets de papier	4	4,39	3,76	3,20	2,91	2,59
divers	12	5,42	4,80	4,22	3,93	3,62
Papier d'emballage	5	4,53	3,90	3,33	3,03	2,73
	15	5,81	5,18	4,60	4,32	4,01
Déchets urbains	2,50	3,56	2,93	2,36	2,07	1,76
organiques	4,50	3,30	2,68	2,11	1,81	1,51
Déchets urbains	2,50	4,19	3,39	2,69	2,34	1,96
mélangés	4,50	3,94	3,13	2,44	2,08	1,71

La liqueur sucrée, après neutralisation, est fermentée sous des conditions aérobies par le micro-organisme *Candida utilis*. Les coûts de fermentation ont été calculés sur deux bases :

- un coût maximum pour une unité de fermentation métallique et une tour de refroidissement,
- un coût minimum pour des unités en bois et l'utilisation d'une source d'eau locale par le refroidissement. Les résultats obtenus sont consignés dans le tableau 14.

Tableau 14

Coûts de production des levures en fonction  
des dimensions de l'unité (40)

Capacité tonnes/jour	Coût de production cents/lb	
	Coût maximum	Coût minimum
80	9,22	5,96
150	7,78	
300	6,60	
500	5,70	3,96
1 000	5,00	

A l'aide des données contenues dans les tableaux 13 et 14 et de la concentration en protéines dans le *Candida utilis*, on peut calculer le coût de la production de protéines pour toutes les tailles d'installation. Le tableau 15 compare ce coût à celui des protéines obtenues à partir d'autres sources (unité de 500 tonnes/jour, rendement de 50 %).

L'examen du tableau 15 montre que la production de protéines à partir des déchets urbains est compétitive. Cependant, aucun programme expérimental à grande échelle n'a été entrepris jusqu'à présent.

Tableau 15

Coûts comparés des protéines  
de diverses origines (40)

Source protéinique	Pourcentage en protéine	Coût \$/lb. de protéine
Farine de soja	44	8 - 14,8
Farine animale	50	8,2 - 12,6
Farine de poisson	60	10,5 - 14,2
Levure Candida utilis	55	18,2 - 26
papier d'emballage		17,8 - 24,7
déchets de papier		14,7 - 18,9
mélange de déchets urbains		13,8 - 17,8
déchets urbains organiques		

V - AUTRES METHODES CHIMIQUES DE CONVERSION DES DECHETS SOLIDES

Les possibilités de conversion chimique des déchets sont pratiquement illimitées. La pyrolyse et l'hydrolyse-fermentation sont des procédés dont l'efficacité a été démontrée au moins à l'échelle pilote. Les autres réactions potentielles n'ont pas franchi le stade du laboratoire.

Deux procédés sont à l'étude au laboratoire :

- l'oxydation partielle des déchets solides organiques en lit fluidisé qui conduit à des composés tels que le méthane, l'éthanoïque, le méthanol et le méthanoïque (41).

- la transformation biochimique des déchets solides. A ce propos, le lecteur pourra consulter des ouvrages récents relatifs à la préparation des protéines (42) et à l'utilisation des déchets plastiques (43).

LA RECUPERATION  
DES MATIERES PREMIERES

Les matières récupérées proviennent essentiellement des déchets suivants :

- boîtes de conserve,
- papier,
- verre,
- plastiques,
- caoutchouc,
- déchets textiles,
- résidus d'incinérateurs.

I - EMBALLAGES METALLIQUES

Les boîtes de conserve sont récupérées à partir des déchets municipaux dans de nombreuses localités américaines. L'incinération ou le compostage s'accompagne souvent du recouvrement des résidus métalliques.

Jusqu'en 1961, la ville de Los Angeles a pu vendre les déchets, ce qui s'est traduit par un revenu annuel de près de 500 000 dollars. Les municipalités ne vendent pas directement les emballages métalliques récupérés, mais par l'intermédiaire d'un ferrailleur ; deux entreprises essentiellement détiennent ce marché, à savoir Proler Steel Company de Houston et Los Angeles By Products Company.

A - Technologie de l'utilisation des emballages métalliques récupérés

Trois utilisations potentielles sont connues :

- fer de précipitation dans une lixiviation pour l'enrichissement du minerai de cuivre,
- source d'étain par extraction chimique,
- fabrication de l'acier.

### 1) Fer de précipitation

L'usage comme fer de précipitation est le plus fréquent, les emballages récupérés se prêtant mal aux deux autres emplois. En outre, l'utilisation dans les mines de cuivre est limitée par les coûts de transport élevés et la demande réduite.

Les minerais de cuivre contiennent une grande variété de composés et nécessitent de nombreuses techniques de raffinage. Les minerais riches en oxydes sont raffinés par un procédé de lessivage basé sur l'échange d'ions cuivre-fer, la source de fer étant constituée par des boîtes de conserve d'où a été extrait l'étain.

Le minerai est rangé sur de grandes piles de boîtes de conserve et une solution d'acide sulfurique de 5 à 10 % s'écoule à travers les piles. Du sulfate cuivrique est formé. Quand celui-ci atteint les emballages, il se forme du sulfate ferreux avec précipitation du cuivre sur les boîtes (44, 45). Le cuivre précipité est lavé, décanté puis fondu. Théoriquement, 0,878 kg de fer sont nécessaires pour précipiter 1 kg de cuivre, en pratique, 2 kg sont nécessaires.

Les boîtes de conserve qui ont subies le déchetage puis l'incinération constituent une source excellente de fer de précipitation grâce à leur aire spécifique élevée (46). De plus, l'incinération élimine les impuretés telles que le caoutchouc et l'étain.

Cependant, le transport est onéreux. On a estimé le coût du transport par rail de Washington aux mines de cuivre de l'Arizona ou de l'Utah à 80 dollars par tonne. Or, les mines peuvent acheter des emballages déchetés entre 50 à 65 dollars par tonne, une limite supérieure est de 75 dollars ; au-delà, on jugerait plus rentable de préparer du fer spongieux à partir de scories. Proler Steel dispose d'installations pour déchetter les boîtes de conserve sur place.

Bien que l'industrie du cuivre soit le plus grand consommateur de métal récupéré, il ne s'agit pas d'un marché infini ; en effet, on raffine moins de 4 % du minerai par le procédé de lessivage (45). On estime que la consommation maximum de boîtes de conserve à espérer représente 5 % de l'ensemble des déchets métalliques. D'autres marchés sont donc à développer.

### 2) Récupération de l'étain

La technique généralement employée est un procédé chimique d'attaque alcaline (47). Les fragments métalliques sont traités par une solution chaude de soude caustique en présence d'un oxydant, nitrate ou nitrite de sodium ; l'étain est alors dissout sous forme de stannate de sodium. On le récupère soit sous forme métallique par électrolyse, soit sous forme d'oxyde par neutralisation de la solution à l'acide sulfurique ou carbonique. Cependant, il se produit des interférences avec les vernis, graisses ou cires. L'opération est donc liée à la possibilité d'avoir des boîtes de conserve propres.

On a évalué à 90 % des plaques d'étain produites la perte due à l'agencement déficient des boîtes de conserve.

### 3) Fabrication d'acier

La fabrication d'acier à partir de déchets métalliques se heurte à de nombreuses difficultés d'ordre technologique et économique, le prix de ces déchets étant particulièrement fluctuant. Les subtilités de cette industrie ont fait l'objet de quelques articles (48, 49). La présence d'étain et de zinc constitue également un inconvénient.

## B - La récupération

La plupart des unités de compostage prévoient une séparation magnétique des déchets afin de récupérer les emballages métalliques. De plus, cette récupération a lieu dans onze incinérateurs municipaux et deux incinérateurs privés (1) (tableau 16).

La plupart des incinérateurs vendent leurs boîtes de conserve à Proler Steel Company entre 10 à 20 dollars par tonne. Elles sont expédiées, en majorité, dans les mines de cuivre de l'ouest, une petite fraction part pour l'Amérique du Sud.

Tableau 16

Treize incinérateurs pratiquent la récupération  
des emballages métalliques (1968) (32)

Situation géographique	Unité	Année de construction	Capacité t/j	Revenus de la récupération \$/t	Investissements	
					total \$	Equipement de récupération
Atlanta, Georgie	Mayson	1939 et 1952	700	17,58	2 050 000	
Atlanta, Georgie	Hartsfield	1963	500	17,58	3 338 000	200 000
Louisville, Kentucky		1957	1 000	18,52		
Chicago, Illinois	Southnest	1963	1 200	11,23	6 825 000	
Chicago, Illinois	Stickney (privé)	1958				
Chicago, Illinois	Boda					
Chicago, Illinois	Medile	1956	786	11,23		
Chicago, Illinois	Calunet	1959	1 200	11,23		
Broward Country Floride	n°1	1964	150		1 200 000	40 000
Broward Country Floride	n°2	1964	150		1 200 000	40 000
Tampa, Floride		1967				
Dayton, Ohio	Montgomery Country	1967				
De Kalb Country Georgie		1967				

## II - LE PAPIER

Il s'agit ici de la récupération du papier en vue de sa réutilisation. En 1966, 10 millions de tonnes de papier ont été récupérées, ce qui représente 21 % de la quantité totale de matériau employé dans la fabrication de papier et de carton aux Etats-Unis.

On peut définir essentiellement trois catégories de papier :

1) Le substitut de pâte à papier constitué par les coupures de papier ordinaire non imprimé : il ne nécessite pas un traitement poussé, à part le défilage.

2) Les imprimés constitués par les lourds volumes et les livres de comptes ; l'utilisation des magazines a périclité à cause de l'emploi croissant d'adhésifs et autres entaminants qui rendent la "désimpression" peu rentable avec la technologie existante. Un nouveau procédé plus économique pour traiter les journaux a été développé par GARDEN STATE PAPER COMPANY (50, 51, 52). Cette catégorie représente 15 à 20 % de la quantité totale de papier utilisée aux Etats-Unis (1).

3) La troisième catégorie englobe toutes les autres sortes de papier, soit 70 % de l'ensemble (53). Ces papiers sont principalement utilisés dans la fabrication de carton à divers usages, tels que boîtes, cartons d'oeufs, pots de fleurs, isolapts, matériaux de construction.

Le tableau 17 présente les prix des déchets de papier pour quelques catégories. Ces prix varient avec le temps et la situation géographique ; la récupération du papier n'est rentable que si ces prix sont inférieurs à ceux de la pulpe de bois.

### Récupération du papier à partir des déchets solides municipaux

Potentiellement, c'est la récupération du papier journal qui est la plus attrayante. Les magazines emploient des quantités croissantes d'encre spéciales, d'adhésifs, ce qui rend leur réutilisation difficile. La situation du papier d'emballage est la même, sa destination étant de protéger, il est lui-même traité avec des vernis ou autres revêtements. De plus, l'emballage est souvent contaminé parce qu'il protège.

Tableau 17

Prix des déchets de papier  
selon leur catégorie (54,55)

Catégorie	Prix au 20 janvier 1967 \$/tonne
Mélange de papiers en balles pesant plus de 500 lb et contenant moins de 25 % de matériaux mous tels que des journaux	8 - 9 (New-York)
Mélange de papiers en balles de plus de 60 in. de longueur et contenant moins de 10 % de matériaux mous tels que des journaux	11 - 13 (Chicago)
Journaux emballés en balles de plus de 54 in. de longueur, contenant moins de 5 % des autres papiers	15 - 16 (New-York)
Papier journal frais, non brûlé par le soleil, présenté sous forme de balles de plus de 60 in. de longueur, sans autres papiers et ne contenant pas trop de couleurs	18 - 20
Couvertures de magazine	22 - 23 (New-York)
Emballages en balles de plus de 94 in. de longueur	16 - 18

Le National Committee for Paper Stock Conservation est intéressé par le développement de la récupération du papier journal et du carton, mais il insiste sur la nécessité d'obtenir un produit fini de grande qualité. Il recommande sur la nécessité de séparer le papier journal et le carton des autres déchets au sein des ménages. La récupération du papier est couramment pratiquée mais sur une petite échelle. La plupart des unités de compostage séparent le papier journal pour le récupérer, mais aussi pour préserver la qualité du compost. Approximativement, un ouvrier peut trier 95 à 0,75 t/h, ce qui représente un coût de l'ordre de 3,5 à 5 dollars/tonne.

Si l'on considère que le matériau récupéré renferme globalement toutes sortes de papiers, il est possible d'en estimer le marché potentiel. Ce papier représente 70 % de la quantité totale, soit 7 millions de tonnes par an. Si le papier journal en représente 22 %, la récupération annuelle sera de 35 millions de tonnes, soit cinq fois la demande nationale... Le marché semble limité.

### III - LE VERRE

La proportion de verre dans les déchets municipaux a considérablement augmenté ces dernières années, essentiellement par suite de l'emploi des emballages consignés.

Il y a dix ans, une bouteille consignée faisait en moyenne 35 à 40 allers et retours ; actuellement, elle n'en fait plus que 8. Un emballage perdu ne fait qu'un aller simple (1).

Nous ne nous étendrons pas sur les aspects techniques de la séparation du verre. Signalons que le séparateur SORTEX permet de trier les verres selon leur couleur.

Il y a essentiellement deux catégories de verre récupérables :

- les bouteilles,
- le verre débité en plaques.

La seconde catégorie dispose du plus grand marché car ce matériau sert à fabriquer de la poudre de verre qui a des applications industrielles variées (peinture phosphorescente, abrasifs, têtes d'allumettes, matériaux réfractaires, nettoyage des pièces de coulée).

Cependant, les bouteilles constituent l'essentiel des ordures en verre. Leurs débris étaient la matière première essentielle de la fabrication des bouteilles, il y a trente à quarante ans. L'importance de ce marché a décliné à cause des coûts croissants du nettoyage et de l'agencement des débris de bouteille.

Un acheteur de débris de verre à Cleveland précise que la seule forme de débris pour laquelle il existe un marché à Cleveland est constituée par les bouteilles brisées ou défectueuses des fabricants de bouteilles (56).

Il n'y a pas de raison technique pour laquelle les débris de verre ne pourraient être utilisés dans la fabrication de poudre. Le problème, c'est l'abondance des débris de plaques de verre qui excèdent largement la demande.

Un autre usage pourrait être la fabrication de mousse de verre. Un procédé polonais permet de préparer de la mousse de verre à partir de débris non triés, (57). Le marché est, cependant, là encore, très limité.

#### IV - LES PLASTIQUES

Les plastiques constituent seulement 1 % des déchets. Des études de BATTELLE ont indiqué que ce pourcentage augmentera jusqu'à 3 % en 1976 pour un total de 11 millions de livres de déchets plastiques annuels (58). Cette croissance est due à la plus grande propension à l'utilisation d'emballages plastiques.

De façon générale, les plastiques appartiennent à deux catégories.

Les thermoplastiques sont facilement récupérés par fusion. Les autres plastiques par contre, ne peuvent être remodelés ; ils sont composés de réseaux reliés entre eux de façon très rigide. La force de ces liaisons rend les plastiques résistants à la chaleur et aux agents chimiques ; ils conservent leur forme jusqu'à leur température de décomposition.

Les principaux thermoplastiques contenus dans les déchets solides ont été identifiés par BATTELLE (58) :

- polyéthylène : 38 %
- chlorure de polyvinyle : 32 %
- polystyrène : 21 %

La récupération des plastiques est en outre rendue délicate par la contrainte de qualité qui s'exerce sur les débris à traiter. Les matériaux bruts vierges sont vendus entre 0,10 et 0,20 dollar/lb. Cela laisse une marge bien faible pour la récupération et la séparation ; des bouteilles de lait propres et emballées ne rapportent que 0,03 à 0,04 dollar/lb (59).

Un autre problème est constitué par la prédominance de plastiques contenant à la fois des thermoplastiques et des plastiques rigides dont les structures moléculaires sont incompatibles. Le traitement de ces mélanges est impossible.

De plus, il existe plusieurs contraintes quant à l'emploi potentiel des plastiques. Par exemple, une réglementation interdit la réutilisation de plastique comme emballage des aliments.

D'autre part, on se heurte à de nombreux problèmes techniques au cours de la séparation des plastiques. La première tentative américaine a eu lieu à l'unité de compostage de Gainesville en Floride, où un séparateur de type balistique a été utilisé en conjugaison avec un courant d'air fonctionnant comme un gigantesque aspirateur.

Actuellement, la récupération du plastique n'est pas particulièrement prometteuse. Il n'existe pas de techniques pour traiter les plastiques mélangés dans la fabrication de nouveaux produits, bien qu'on ait suggéré que les polymères à chaîne courte soient récupérés à partir des plastiques fixes par pyrolyse (60).

## V - LE CAOUTCHOUC

Deux facteurs sont spécifiques dans la réutilisation du caoutchouc :

- il existe une méthode pratique de récupération,
- le mélange de caoutchouc synthétique et naturel ne constitue pas une contrainte.

La possibilité de trouver sur le marché du caoutchouc recyclé à bon compte a influé sur le prix du caoutchouc brut en minimisant les hausses de ce dernier (60). De plus, le caoutchouc recyclé présente des avantages technologiques sur les caoutchoucs brut et synthétique. En effet, il peut être travaillé mécaniquement plus rapidement.

En outre, un travail expérimental prometteur a été fait dans le domaine de la pyrolyse des déchets de pneus avec production de carbone (61).

La quantité de matières caoutchouteuses contenues dans les déchets municipaux est très basse (0,5 à 1,5 %). Par contre, les pneus usés, généralement abandonnés dans les stations services, constituent la source principale de déchets caoutchouteux qui représente 16 % de la quantité de caoutchouc utilisée aux

Etats-Unis en 1962, soit 360 000 tonnes (62). Le caoutchouc recyclé est, le plus souvent, utilisé dans la fabrication de nouveaux pneus (60 %). Il sert également à la fabrication de tapis d'automobile, joints d'étanchéité, durites, semelles et pièces de moteur.

Le prix du caoutchouc recyclé varie avec la demande mais aussi avec la situation géographique. A Saint-Louis, où la demande est forte, on paye 14 dollars par tonne. A Los Angeles par contre, le prix n'est que de 7,5 dollars par tonne (60).

## VI - LES DECHETS TEXTILES

Les déchets textiles sont récupérés pour utilisation dans la fabrication de papier à lettre de qualité et de papier pour tapissage. En général, la séparation des autres résidus n'est guère pratique à cause de la présence de contaminants de tous ordres et de la difficulté de distinguer entre les fibres naturelles et synthétiques. Ces dernières ne peuvent être utilisées dans l'industrie du papier. La récupération de déchets textiles a donc un faible potentiel économique.

Cependant, deux unités de compostage pratiquent cette récupération quand le prix des débris atteint 40 dollars par tonne (1).

Le triage manuel est cher, mais c'est le seul moyen d'obtenir un produit satisfaisant. Insistons sur le fait qu'il s'agit ici d'une activité marginale.

## VII - LES RESIDUS D'INCINERATION

Le Bureau of Mines accomplit des recherches approfondies sur la récupération des résidus d'incinération (63, 64, 65). Une unité pilote traitant 1 000 lb/h de résidus permet de récupérer des matériaux ferreux, de l'aluminium, des alliages aluminium-zinc, et du verre. On a pu estimer les coûts engendrés par cette récupération pour quatre unités hypothétiques (tableau 18).

Tableau 18

Coûts engendrés par la récupération  
des résidus d'incinération (65)

Capacité de l'unité tonnes/jour	Temps de travail heures/jour	Coûts fixes dollars	Coûts de fonctionnement (tonne de résidus secs)
250	8	1 411 500	4,03
400	8	1 929 100	3,22
670	24	1 408 500	2,40
1 000	24	1 725 200	1,83

CONCLUSIONS

I - LE RECYCLAGE ET LA TRANSFORMATION

Il semble évident que la récupération des matières premières, sauf peut-être pour les emballages métalliques, bénéficie d'un potentiel économique bien plus réduit que la transformation en sous-produits. Et ce, pour deux raisons. La première est l'adéquation et les bas prix de la plupart des matériaux vierges. La seconde est la haute qualité exigée des matériaux recyclés et l'absence d'une technologie de la séparation suffisamment fixe .

Même la récupération des emballages métalliques à grande échelle semble peu attrayante sauf s'il devient possible de nettoyer suffisamment ces résidus afin de les utiliser dans la fabrication d'acier. Comme nous l'avons remarqué, même l'utilisation en tant que fer de précipitation dispose d'une demande limitée.

Le papier représente le matériau le plus abondant dans les déchets municipaux et nous avons vu les problèmes que soulevait sa récupération. Le triage manuel est la seule technique à efficacité comparable à la séparation magnétique des matières ferrugineuses. Son recyclage est rendu délicat par les diverses substances contaminantes. La récupération du verre, du plastique, ou du caoutchouc est également difficile.

La technique la plus prometteuse pour augmenter le potentiel économique du recyclage est la séparation dans les foyers entre le papier journal propre et les autres papiers. Le papier recyclé dispose d'un marché défini et un long potentiel de recyclage si une fourniture continue de matériau propre peut être garantie.

L'élaboration de sous-produits à partir des déchets municipaux bénéficie d'un potentiel économique plus vaste permettant de pratiquer dans le futur une valorisation à grande échelle. Un motif de ce choix serait la faible probabilité de voir se développer une technologie suffisamment adaptée pour assurer une grande qualité des produits recyclés.

Insistons sur le raisonnable de cette attitude seulement en économie classique. Sous la pression de problèmes tels que diminution des ressources, pollution de l'environnement, les motivations pourraient évoluer et le recyclage devenir indispensable. Le National Center for Resource Recovery accomplit des efforts en ce sens qui se sent concrétisés par la réalisation d'une unité pilote assurant le recyclage des matières contenues dans les déchets solides (66).

## II - QUE FAUT-IL RECHERCHER ?

On peut essayer de définir quels seront les grands axes de recherche.

Les techniques de recyclage doivent être développées dans le domaine du nettoyage et de l'élimination de l'étain des emballages métalliques. Les procédés chimiques ou thermiques sont à étudier.

L'élaboration de nouveaux sous-produits et de nouveaux usages doit être développée. On peut constater que malgré de grandes possibilités de transformation, seules quelques techniques sont employées et le nombre de sous-produits est relativement limité.

Pour le compostage, il faut soit développer de nouveaux marchés, soit diminuer les coûts de fabrication par transformation des procédés. Une application possible serait la récupération des terres arides et des mines abandonnées. Le temps de préparation pourrait être réduit par une digestion aérobie d'une boue aqueuse de déchets solides.

La récupération de la chaleur nécessiterait une étude qui déterminerait l'influence des paramètres caractérisant les déchets sur l'économie du procédé. Il faut noter que cet agencement des résidus doit être considéré en fonction des problèmes de pollution atmosphérique.

## III - ECONOMIE DE LA VALORISATION

Il semble, qu'au sens de l'économie classique, le recyclage des déchets ne soit pas rentable. Et ce, pour des raisons multiples ; le transport et les coûts de traitement sont si élevés que les produits recyclés ou transformés sont plus chers que leurs homologues conventionnels, à moins de travailler à perte dans une situation de marché libre.

Malgré cette situation, le développement des techniques de valorisation doit être poursuivi en vue de situations non classiques telles que carence des ressources ou pollution excessive. Les Etats-Unis évoluent rapidement vers une forme de société où, dans un domaine comme la lutte contre la pollution, la notion de dollar n'est plus prédominante.

L'opinion de BATTELLE est que les coûts engendrés par l'agencement des déchets soient évalués en termes de coûts socio-économiques de la pollution. Il est donc possible que le champ d'épandage devienne une technique inusitée, non parce que moins rentable que la récupération mais pour des considérations d'esthétique, de dégradations de l'environnement.

Bien qu'il soit facile de concevoir que les considérations de coût social prévaudront sur les contraintes économiques classiques, l'orientation prise par l'agencement des déchets sera délicate à prévoir. Un effort commun est requis des techniciens, des écologistes, des économistes et des sociologues pour édifier une échelle des méthodes de valorisation.

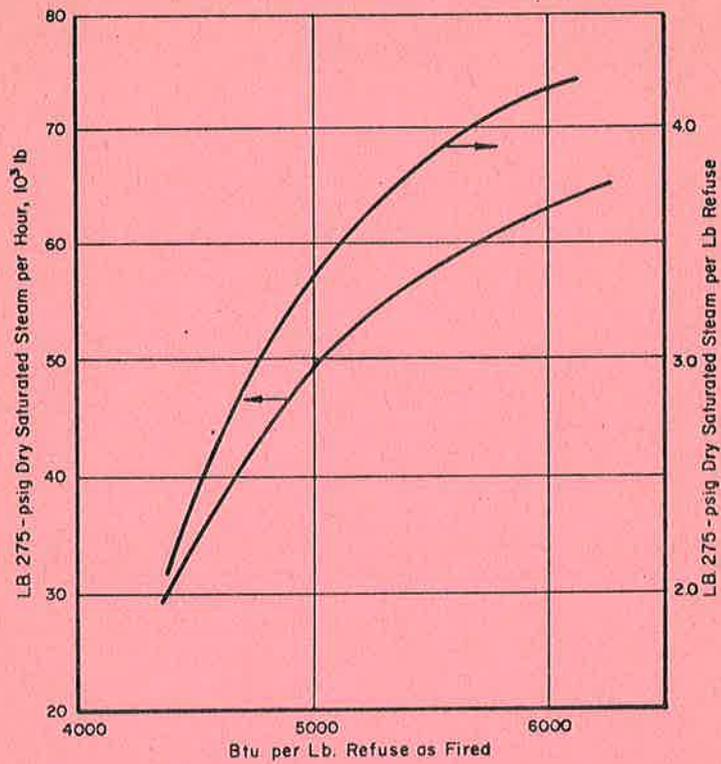


Fig. 1 : Production de vapeur à Norfolk  
selon le pouvoir calorifique des déchets

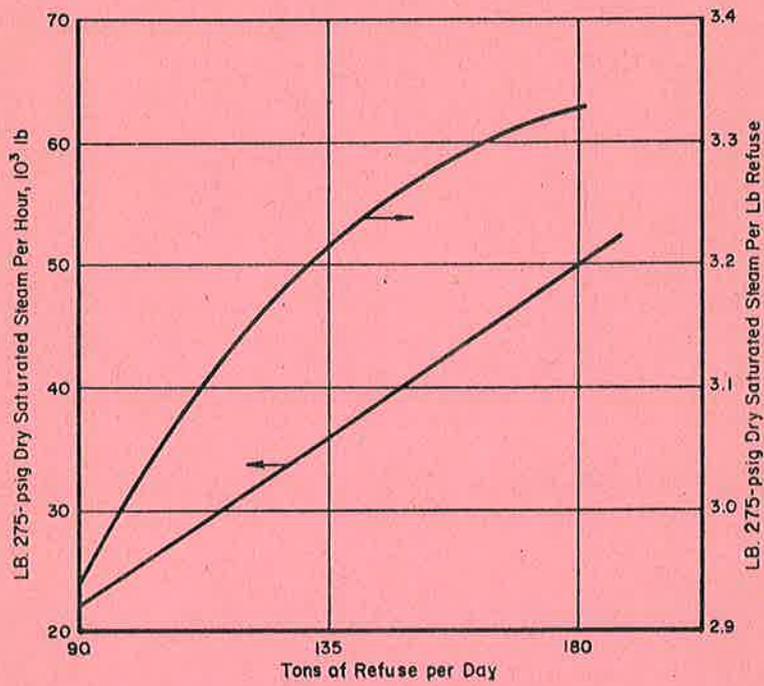


Fig. 2 : Production de vapeur à Norfolk  
selon la charge en déchets (29)

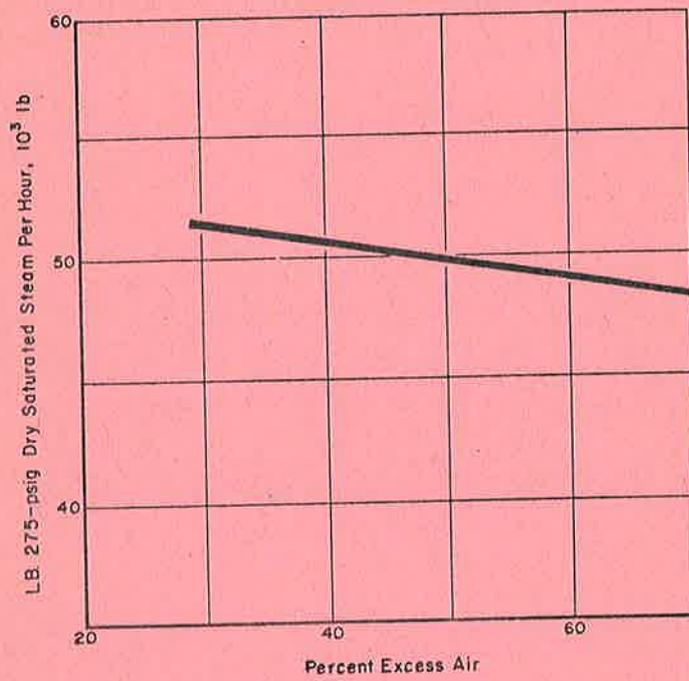


Fig. 3 : Production de vapeur à Norfolk  
selon l'excès d'air (29)

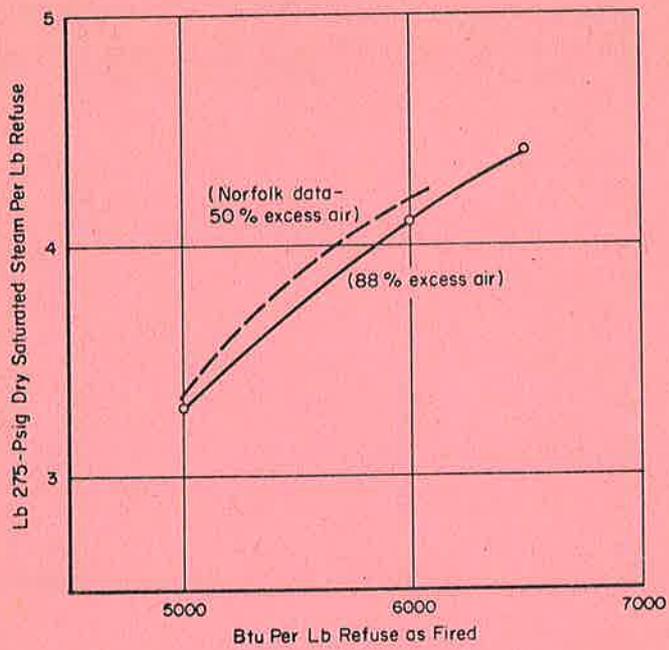
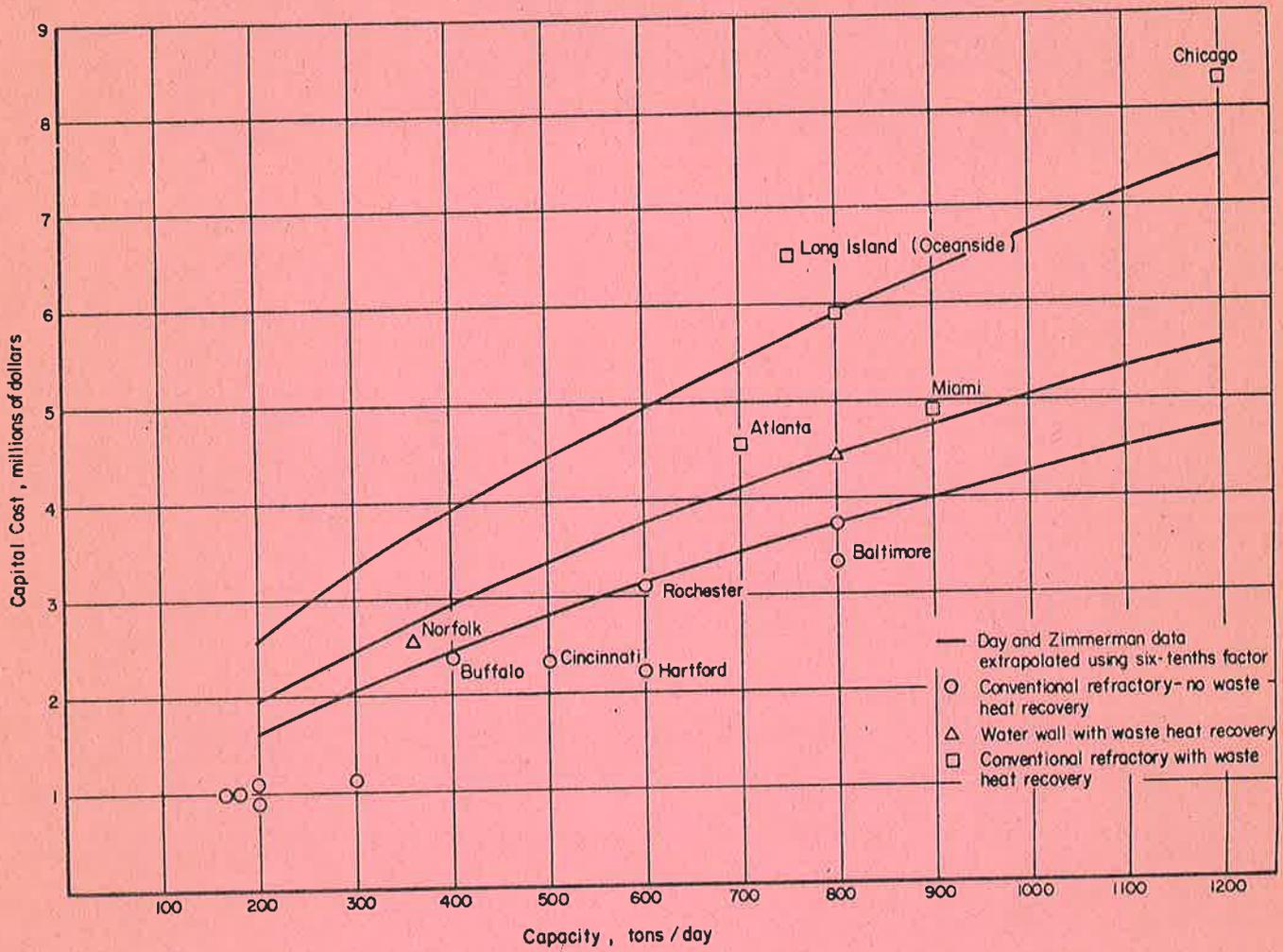
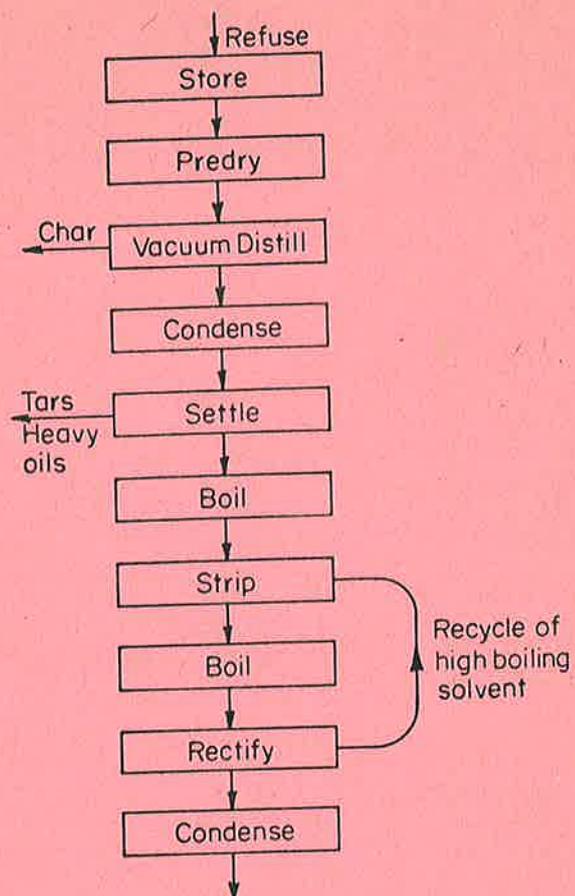


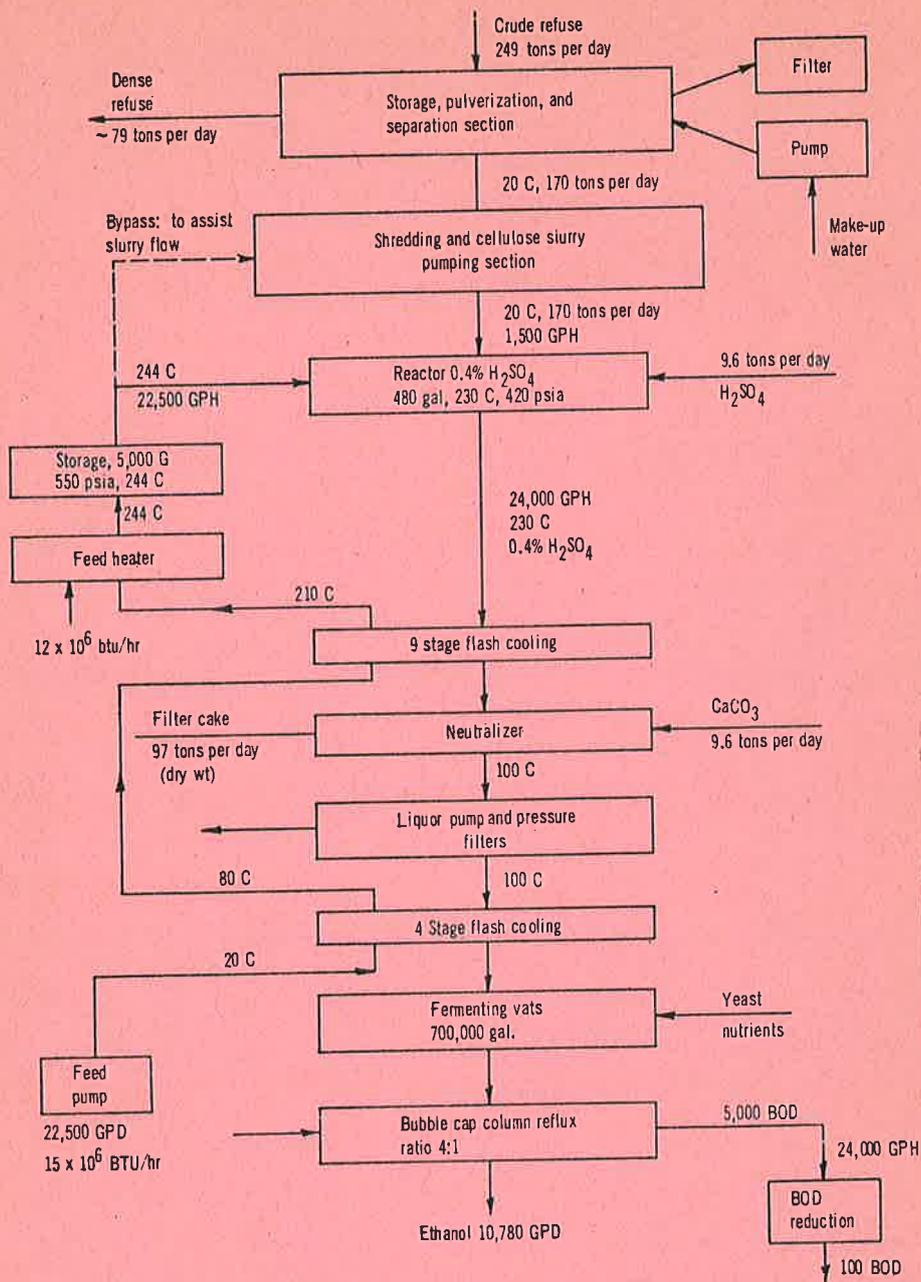
Fig. 4 : Investissements nécessaires  
aux incinérateurs municipaux (31)



*Fig. 5* : Investissements nécessaires  
aux incinérateurs municipaux (1)



*Fig. 6* : Fabrication d'ethanoïque à partir de déchets (37)



*Fig. 7* : Production d'éthanol  
à partir de déchets (37)

BIBLIOGRAPHIE

- (1) N.L. DROBNY, H.E. HULL, R.F. TESTIN : U.S. E.P.A. Contract n° P 17 86-67-265, 1971.
- (2) C.A. ROGUS : Refuse quantities and characteristics Proceedings, National Conference on Solid Waste Research. Chicago, American Public Works Association, 1963, p. 17-27.
- (3) M. BELL : Characteristics of municipal refuse. Ibid, p. 28-38.
- (4) E.R. KAISER, C.D. ZEIT : 1968, cité par (1).
- (5) J. HOUSER : 1967, cité par (1).
- (6) J.E. HEER : 1967, cité par (1).
- (7) W. GALLER : 1967, cité par (1).
- (8) Bureau of Solid Waste Management (SW - 8 ts). Communication Personnelle.
- (9) Reclamation of municipal refuse by composting. Sanitary Engineering Research Project, Technical Bulletin n° 9, Series 37, Berkely, University of California, juin 1953.
- (10) Composting for disposal of organic refuse. Sanitary Engineering Research Project, Technical Bulletin n° 2, Series 37. Berkeley, University of California, août 1950.
- (11) E.T. SHERIDAN : Advance data on peat. In Mineral Industry Surveys. U.S. Bureau of Mines, 22 août 1967.
- (12) S.A. HART : Solid waste management, composting, European activity and American potential. Public Health Service Publication, n° 1 821. Washington, U.S. Government Printing Office, 1968.
- (13) Compost Science, Rodale Press. Inc., Emmanus, Pa.
- (14) Composting of municipal solid wastes in the United States. Publication de l'U.S. E.P.A., SW - 47 n, 1971.
- (15) Solid Wastes Management ; 1968, 11 (5), 23.
- (16) C.I. HARDING : Recycling and utilization in Proceedings ; the Surgeon General's Conference on solid waste management for Metropolitan Washington, 19-20 juillet 1967.
- (17) Communication FAIR FIELD-HARDY Co.
- (18) J.R. SNELL : Compost Science, 1967, 8 (1), 17.
- (19) Aerospace Commercial Corporation.

- (20) A. EGGEN, D.A. POWELL J.R. : Feasibility study of a new solid waste system. University of Hartford Report DUST/TR 701 Hartford, Connecticut, nov. 1967.
- (21) P.M. SULLIVAN : Cité par (1).
- (22) R.D. SPEER : Cité par (1).
- (23) American Society of Mechanical Engineers Incinerator Committee, Midwest Section. Minutes of meeting, Chicago, 3 juin 1966.
- (24) J.G. PHELPS : Cité par (1).
- (25) C.R. VELZY, C.O. VELZY : Unique incinerator develops power and provides salt water conversion Public Works, 1964, 95 (4), 90-95.
- (26) D. LERBERG : Air Conditioning, Heating and Ventilating, 1965, 62 (6), 53-57, et même revue, 1965, 62 (7), 73-74.
- (27) Refuse Removal Journal, 1967, 10 (4), 18-34.
- (28) L.F. DEMING : The steam generating incinerator plant. Communication présentée à l'American Power Conference, Chicago, 26-28 avril 1966.
- (29) H.C. MOORE : Refuse fired steam generator at Navy base, Norfolk, Virginia. In Proceedings, MECAR Symposium on incineration of Solid Wastes, New-York, 22-23 mars 1967. Metropolitan Engineers Council on Air Resources, p. 10-21.
- (30) Industry teams up to build joint waste disposal plant. American City, 1968, 83 (1), 101.
- (31) G. STABENOW : Performance and design data for large European refuse incinerators with heat recovery. Proceedings, 1968, National Incinerator Conference, American Society of Mechanical Engineers, New-York, 5-8 mai 1968, p. 278-286.
- (32) DAY & ZIMMERMANN : Engineers and Architects. Special studies for incinerators ; for the Government of the District of Columbia, Department of Sanitary Engineering. Public Health Service Publication, n° 1 748, Washington, U.S. Government Printing Office, 1968, p. 55-73.
- (33) S.M. CLARKE : Public Works, 1962, 93 (9), 122-23.
- (34) A. MICHAELS : Incineration Public Works Engineers Handbook, Chicago, American Public Works Association, 1957.
- (35) E.R. KAISER, S.B. FRIEDMAN : Pyrolysis of municipal refuse Presented at Engineering Foundation Research Conference, Solid Waste Research and Development, University School, Milwaukee, Wisconsin, 24-28 juillet 1967.
- (36) P.A. HOFFMAN, R.A. FITZ : Environmental Science & Technology, 1968, 2 (11), 1023-1026.
- (37) A. PORTEOUS, A.S.M.E. Paper n° 67-WA/PIDZ présenté au Winter Annual Meeting and Energy Systems Exposition, American Society of Mechanical Engineers, Pittsburgh, Pa, 12-17 novembre 1967.

- (38) E.R. KAISER, S.B. FRIEDMAN : The pyrolysis of refuse components. Communication présentée au Symposium on Air Pollution Control through Applied Combustion Science, 60th Annual Meeting of the American Institute of Chemical Engineers, New-York, 26-30 nov. 1967.
- (39) Cementator Section. Chem. Eng., 1965, 74 (15), 91.
- (40) F.H. MELLER : Production of protein from solid wastes. D Conversion of organic solid wastes into yeast ; an economic evaluation.
- (41) E.F. MAZIARA : Jr. The partial combustion of paper wastes. Thesis (M.S.) Troy, New-York, Rensselaer Polytechnical Institute, 1967.
- (42) C.D. CALLIHAN, C.E. DUNLAP : Construction of a chemical microbial pilot plant for production of single-cell protein from cellulosic wastes, U.S. E.P.A., 1971.
- (43) M.E. BANKS, W.D. LUSK, R.S. OTTINGER : New chemical concepts for utilization of wastes plastics, U.S. E.P.A., 1971.
- (44) E.J. PRYOR : Mineral dressing. Elsevier Publishing Company, Ltd., Amsterdam, 1965, p. 410-456.
- (45) A. STANDER : Kink-Othmer encyclopedia of chemical technology, John Wiley & Sons, New-York, 1965.
- (46) DAY & ZIMMERMAN : Engineers and Architects. Can-metal recovery. Special Studies for incinerators ; for the Government of the District of Columbia, Department of Sanitary Engineering. Public Health Service Publication n° 1748. Washington, U.S. Government Printing Office, 1968, p. 55-73.
- (47) KIRK-OTHMER : Encyclopedia of chemical technology, v. 14, New-York, Interscience Publishers, 1955, p. 151-156.
- (48) H.R. NEAL : Iron Age, 1966, 197 (25), 73-78.
- (49) Ferrous scrap problems by the yardful 33/. The Magazine of Metals Producing, 1966, 4 (3), 81-104.
- (50) T.J. HOOPER : Newark (N.J.) Sunday News, p. 8-10, 25, 26, 8 avril 1962.
- (51) L.H. BLACKBERRY : Pulp and Paper, 1967, 41 (14), 24-29.
- (52) D.R. WALKER : Pulp and Paper, 1967, 41 (24), 37-38.
- (53) D.W. BERGSTROM : The economics of secondary fiber usage. 12th Deinking Conference, St-Louis, Technical Association Pulp and Paper Industry, 13 octobre 1967.
- (54) Paper stock standards and practices. Circular PS-66, New-York, National Association of Secondary Material Industries, Inc., 1966.
- (55) H.A. LINDENBERG : Pulp and Paper, 1967, 41 (5), 17.
- (56) E. STERN : Bassichis Glass Company, Cleveland, Ohio, 20 décembre 1967.
- (57) W. TUSZYNSKI, M. DOBRZANSKI : Method to manufacture foam glass. Brevet polonais 48847, 19 décembre 1964.

- (58) M.E. FULMER, R.F. TESTIN : Role of plastics in solid waste. New-York, Society of the Plastics Industry, mai 1967.
- (59) D.G. LINNEHAN : Bureau of Mines, Washington D.C. Communication personnelle, avril 1973.
- (60) C.G. GOLUEKE, P.H. MAC GAUHEY : Comprehensive studies of solid wastes management. SERL Report n° 67-7, Berkeley, University of California, mai 1967.
- (61) E.C. CAMERON : Président de CAMERON-YAKIMA Inc., Communication personnelle, avril 1973.
- (62) C.H. LIPSETT Industrial wastes and salvage conservation and utilization. 2e éd. chap. 52, New-York, the Atlas Publishing Co, Inc, 1963, p. 296-302.
- (63) C.B. KENAHAN, P.M. SULLIVAN : A P.W.A. Reporter, 1967, 34 (3), 5-8.
- (64) G. RAMPACEK : Reclaiming and recycling metals and minerals found in municipal incinerator residues. In Proceedings, Minerals Waste Utilization Symposium, 27-28 mars 1968, Chicago, IIT Research Institute, p. 129-131.
- (65) J.J. HENN, F.A. PETERS : Cost Evaluation of a Metal and Mineral Recovery Process for Treating Municipal Incinerator Residues. U.S. Bureau of Mines Information circular 8533, 1971.
- (66) Materials Recovery System. National Center for Resource Recovery, Washington, D.C. Décembre 1972.



