

DOCUMENT PUBLIC

***Modélisation des transferts de matière et d'énergie
au cours de l'incinération d'ordures ménagères :
Synthèse bibliographique***

Etude réalisée dans le cadre des opérations de recherche du BRGM 00POL-D-03

C. Le Guern

*avec la collaboration de
P. Piantone (BRGM-EPI-DEM) et H. Lesueur (ANTEA)*

**décembre 2000
BRGM/RP-50795-FR**



Mots clés : incinération, modélisation, matière, énergie,

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Le Guern C. (2000) - **Modélisation des transferts de matière et d'énergie au cours de l'incinération d'ordures ménagères : Synthèse bibliographique**, Rapport BRGM/RP-50795-FR., 52 p., 2 annexes, 20 tableaux, 6 figures.

Synthèse

L'outil d'aide à la décision pour la gestion des déchets ménagers, qui sera construit dans le cadre du projet européen AWAST, s'appuiera sur l'analyse des différents procédés de traitement des déchets. De ce fait, une étape clef du projet consiste à harmoniser les descriptions des principaux procédés de transformation des déchets. En vue de préparer la réflexion associée, nous avons réalisé un point bibliographique sur les approches matière et énergie dans la modélisation de l'incinération. Bases des modèles d'usines d'incinération, ces dernières s'appuient sur la description de la matière, le bilan de masse, le suivi de la transformation chimique (et physique) de la matière et le bilan enthalpique.

Les paramètres de description de la matière concernent les différents flux de matière entrant et sortant de l'usine. Des paramètres comme le débit massique, la composition (chimie élémentaire, composants de base,...) et la capacité calorifique sont utilisés fréquemment dans les modèles d'incinération.

Le bilan de masse s'appuie sur le principe de conservation de la matière. Il nécessite la connaissance des débits de matière entrant et sortant aux différents niveaux du système considéré et des compositions chimiques des flux. La transformation chimique de la matière peut être appréhendée de plusieurs manières : a) via une approche thermodynamique chimique, qui malgré la méconnaissance de nombreux paramètres locaux, permet une première évaluation de la formation théorique et de la stabilité des composés attendus ; b) via une approche cinétique chimique, qui se heurte aux mêmes difficultés que l'approche thermodynamique ; c) via une approche simplifiée de la chimie, utilisant des lois de comportement générales. Le bilan enthalpique, appliqué couramment pour effectuer des bilans de fonctionnement d'usines d'incinération, se calcule à partir de paramètres tels que la température et le pouvoir calorifique.

Les calculs liés au bilan de masse, au suivi de la transformation chimique et au bilan enthalpique peuvent s'effectuer à plusieurs échelles : globalement sur les flux de matière entrant et sortant de l'usine, à l'échelle d'opérations unitaires ou spécifiquement sur certains éléments chimiques. Dans le cadre du projet AWAST, le choix de l'échelle de calcul devra prendre en compte d'une part la disponibilité de l'information et les incertitudes sur les données nécessaires aux calculs, et d'autre part les objectifs visés.

Sommaire

1. Introduction	9
2. Approche simplifiée de l'incinération.....	11
2.1. Description du procédé.....	11
2.2. Description des flux.....	13
2.2.1. Flux de matière	13
2.2.2. Flux d'énergie.....	17
3. Modélisation de l'incinération : approches matière et énergie	21
3.1. Description de la matière.....	21
3.2. Bilan de masse	22
3.3. Transformation chimique de la matière.....	24
3.3.1. Principales réactions chimiques.....	25
3.3.2. Approche thermodynamique chimique	26
3.3.3. Approche cinétique chimique.....	26
3.3.4. Fonctions de transfert	26
3.4. Bilan énergétique.....	28
3.5. Difficultés pratiques	31
3.6. Exemples de combinaison des approches matière et énergie	32
Conclusion	35
Bibliographie.....	37

Liste des figures

Figure 1 : Principales étapes de l'incinération des déchets ménagers.....	12
Figure 2 : Exemple d'installation d'incinération des ordures ménagères en four à grille avec récupération d'énergie (source : brochure von Roll).....	12
Figure 3 : Description à différents niveaux d'un déchet à incinérer comme utilisé dans le Système Expert développé par la Société Bertin (d'après Mulet et Prebende, 1991).....	21
Figure 4 : Données sur les flux nécessaires pour établir un bilan de masse (modifié d'après Mulet et Prebende, 1991).....	23
Figure 5 : Répartition des flux partiels initiaux contenus dans les déchets dans les différentes catégories de rejet (d'après Sandvik et al, 1999).....	27
Figure 6 : Paramètres à renseigner dans le cadre du bilan énergétique d'une usine d'incinération (hors chaudière) selon Mulet et Prebende (1991)	29

Liste des annexes

Annexe 1 : Origine des polluants présents dans les fumées d'incinération des déchets ménagers

Annexe 2 : Logiciels de simulation de l'incinération des déchets

Liste des tableaux

Tableau 1 : Normes européennes de rejets atmosphériques pour les usines d'incinération d'ordures ménagères (juillet 2000).....	11
Tableau 2 : Les 3 composants essentiels des déchets ménagers en rapport avec l'incinération.....	14
Tableau 3 : Composition chimique des mâchefers - principaux éléments (d'après Le Goux et Le Douce, 1995).....	15
Tableau 4 : Composition chimique des fumées d'incinération de déchets ménagers en sortie de four, c'est-à-dire sans traitement (a : Le Goux et Le Douce, 1995 ; b : Di Chirico in Pérez, 1998).....	15
Tableau 5 : Composition chimique de 2 REFIOM. Le Refiom A correspond aux impuretés solides extraites des fumées par filtration (cendres), le Refiom B a été obtenu après neutralisation des fumées (cendres neutralisées) (Rouvier, 1995).....	16
Tableau 6 : Devenir des déchets ménagers lors de l'incinération en four à grille. Les valeurs sont exprimées en % du flux massique	17
Tableau 7 : Exemple de pouvoir calorifique supérieur de différentes matières contenues dans le déchets (Defrocourt, 1995).....	18
Tableau 8 : De la description Modecom aux différentes catégories prises en compte dans l'incinération	22
Tableau 9 : Eléments entrant et sortant d'une usine d'incinération pris en compte pour le bilan de masse d'après Le Goux et Le Douce (1995).....	23
Tableau 10 : Grandeurs calculées par Morf et al (2000) pour effectuer un bilan élémentaire sur les métaux lourds lors de l'incinération de déchets ménagers.....	24
Tableau 11 : Principales réactions d'oxydation (d'après Le Goux et Le Douce, 1995).....	25
Tableau 12 : Exemple de matrice (données arbitraires en italique) donnant le principe d'une fonction de séparation (d'après Sandvik et al, 1999)	26
Tableau 13 : Distribution des polluants dans les résidus solides d'incinération des déchets (Données de Johnke et al, 1999).....	27
Tableau 14 : Répartition estimée des principaux métaux, métalloïdes et halogènes lors de l'incinération des ordures ménagères. (Le Goux et Le Douce, 1995)	27
Tableau 15 : Comparaison entre la teneur en polluants dans les déchets et dans les mâchefers et éluants d'incinération (valeurs moyennes entre parenthèse).....	28
Tableau 16 : Equations théoriques relatives aux entrées de chaleur dans une usine d'incinération d'ordures ménagères	30
Tableau 17 : Equations théoriques relatives aux sorties de chaleur dans une usine d'incinération d'ordures ménagères	30

Tableau 18 : Mesures standard dans une usine d'incinération (données de Gemperle et Schebdat, 1999) - T : Température ; P : Pression.....	31
Tableau 19 : Modélisation du four : enchaînement des calculs et résultats obtenus	33
Tableau 20 : Paramètres et calculs (non exhaustifs) intervenant dans la modélisation de l'incinération en vue de l'évaluation ou la prévision des performances matière, énergie et environnementale.....	35

1. Introduction

Ce document s'inscrit dans le cadre de la préparation du projet européen AWAST*, dont l'objectif est de réaliser un outil d'aide à la décision convivial pour la mise en place ou l'optimisation de systèmes de gestion des déchets ménagers. L'outil s'adresse à des utilisateurs finaux tels que des communautés urbaines, des bureaux d'étude, des agences environnementales, des industriels impliqués dans la gestion des déchets à l'échelle locale ou nationale... Sa particularité sera d'intégrer les aspects matière, énergie, économie, environnement du traitement des déchets ménagers. A cet effet, l'approche de modélisation s'appuiera sur l'analyse des différents procédés de traitement des déchets. Un des points clefs de la réussite du projet est l'harmonisation des descriptions de la matière et de l'énergie dans les principaux procédés de transformation des déchets : tri, incinération, compostage. En effet, la convivialité du logiciel implique que l'utilisateur ait à entrer des informations aussi simples et aussi peu nombreuses que possible ; par exemple, une description du déchet type Modecom. Avant de commencer la réflexion sur l'harmonisation des descriptions, une synthèse bibliographique sur les aspects matière et énergie (description, transformation) pour chacun des procédés est indispensable.

La présente étude propose pour le procédé d'incinération des déchets ménagers de faire le point sur ce qui existe dans la littérature en terme de :

- description et modélisation des transformations de la matière,
- approche énergétique,

et peut être exploitable dans la philosophie modélisation-simulation de procédés envisagée.

**AWAST : Aid in the Management and European Comparison of Municipal Solid WASTE Treatment methods for a Global and Sustainable Approach: Material, economic, energetic and environmental modelling and simulation tools for the selection, evaluation, and optimisation of a complete MSW chain.*

2. Approche simplifiée de l'incinération

2.1. DESCRIPTION DU PROCEDE

L'incinération est le mode majeur de traitement des déchets ménagers : 40 % des ordures ménagères ont été ainsi traitées en France en 1994. Elle permet, par oxydation des matières sous excès d'air à haute température, de réduire le volume des déchets d'environ 90 %. Plus qu'un mode de traitement, l'incinération est également considérée comme un mode de valorisation des déchets, car l'énergie libérée par la combustion des matières peut être récupérée, sous forme thermique ou électrique. Cependant, la combustion produit des rejets qu'il faut traiter afin de limiter les nuisances environnementales. En particulier, pour respecter les normes en matière de rejet atmosphérique (Tableau 1), des systèmes de traitement des fumées sont systématiquement intégrés aux usines.

<i>Incinérateur</i>	<i>Valeurs limites de rejet</i>
Poussières totales	10 mg/Nm ³
CO	50 mg/Nm ³
HCl	10 mg/Nm ³
NOx	200 mg/Nm ³
SO ₂	50 mg/Nm ³
Dioxines	0.1 ng/m ³
Métaux lourds	< 50 mg/Nm ³

Tableau 1 : Normes européennes de rejets atmosphériques pour les usines d'incinération d'ordures ménagères (juillet 2000)

En terme de procédé, l'usine d'incinération des ordures ménagères regroupe une succession d'opérations unitaires. Les principales étapes sont la combustion des déchets, le refroidissement des fumées avec récupération d'énergie et l'épuration des fumées (Figure 1). Le procédé de combustion le plus couramment utilisé dans le cadre de l'incinération des déchets ménagers est le four à grille (Figure 2) : portés à une température de l'ordre de 1100-1200°C, les déchets produisent en moyenne 5000 m² de fumées à 300-400 mg/Nm³ de NOx par tonne incinérée ; 70 % de l'énergie qu'ils libèrent peut être récupérée (Poignant et Miquel, 1999). L'épuration des fumées est réalisée le plus souvent par lavage en voie humide précédé d'une filtration des poussières.

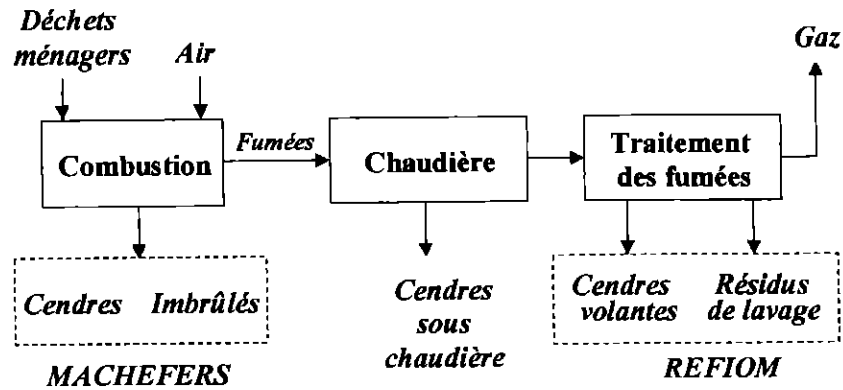
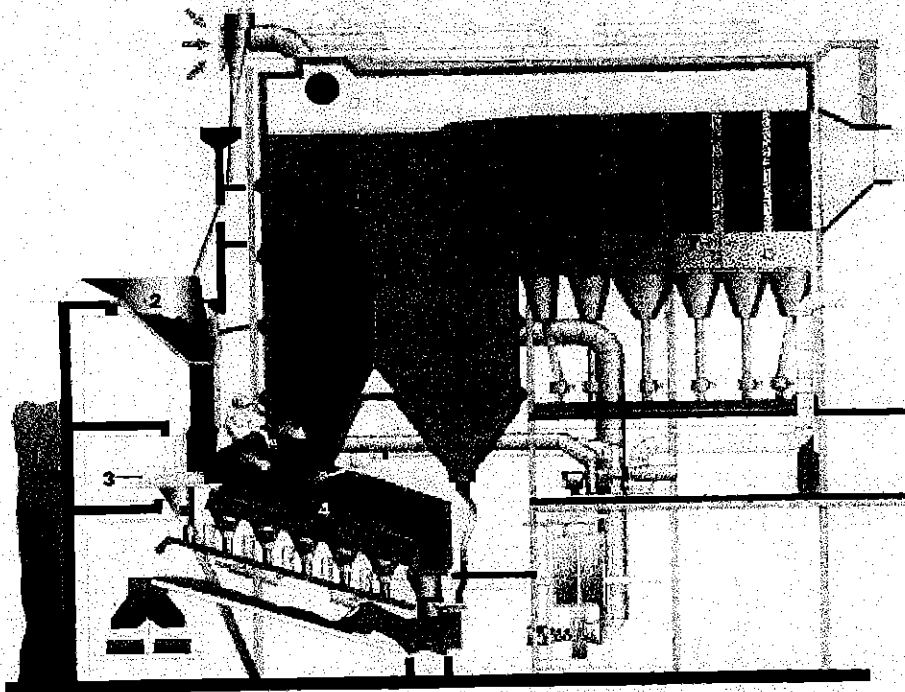


Figure 1 : Principales étapes de l'incinération des déchets ménagers

Installation de valorisation des déchets de Genève-Cheneviers III (2 x 20,8 t/h).



- | | |
|---------------------------|------------------------------|
| 1 Fosse à ordures | 5 Extracteur à mâchefers |
| 2 Trémie d'alimentation | 6 Chambre de post-combustion |
| 3 Poussoir d'alimentation | 7 Chaudière de récupération |
| 4 Grille de combustion | |

Figure 2 : Exemple d'installation d'incinération des ordures ménagères en four à grille avec récupération d'énergie (source : brochure von Roll).

2.2. DESCRIPTION DES FLUX

Le bilan de fonctionnement d'une usine d'incinération s'appuie sur des aspects matière et énergie. Il est donc essentiel de connaître les différents flux de matière et d'énergie relatifs aux différentes étapes du procédé.

2.2.1. Flux de matière

L'incinérateur est alimenté d'une part en déchets, et d'autre part en air, qui apporte l'oxygène nécessaire à la combustion des déchets (Figure 1). Une entrée d'eau a lieu également au niveau du procédé de lavage des fumées.

$$\text{ENTREE} = \text{DECHETS} + \text{AIR} + \text{EAU}$$

L'incinération s.l. des ordures ménagères produit plusieurs types d'émissions et de rejets, principalement :

- les mâchefers ou MIOM (mâchefers d'incinération des ordures ménagères), résidus solides restant en sortie basse du four (cendres, imbrûlés)
- les REFIOM (Résidus d'Épuration des Fumées d'Incinération des Ordures Ménagères), qui comprennent les poussières et cendres volantes, séparées par filtration, et les résidus solides de lavage des fumées, ayant piégé dioxines, NOx, gaz acides (SO₂, HCl) et métaux lourds.
- les gaz, rejetés dans l'atmosphère à l'issue du traitement des fumées.
- les effluents liquides (issus du traitement des gaz par voie humide).

$$\text{SORTIE} = \text{MACHEFERS} + \text{REFIOM} + \text{GAZ} + \text{EFFLUENTS LIQUIDES}$$

Les flux de matière se décrivent en terme de débit et de composition.

a) Composition des différents flux

- **Déchets ménagers**

Du point de vue de l'incinération, les déchets comportent 3 composants essentiels : les matières combustibles, les inertes et l'eau (Le Goux, Le Douce, 1995).

Les Matières combustibles, à base de C et H (papier, bois, végétaux, plastiques) correspondent à la matière organique. De fort pouvoir calorifique (30 à 100 % de celui du pétrole), elles sont indispensables à la combustion. Outre le carbone et l'hydrogène, elles associent les éléments suivants : O, Cl, S, N, qui s'échappent sous forme de gaz,

pour la plupart combinés à l'oxygène en fin de processus. La teneur des ordures ménagères en matières combustibles est comprise en général entre 15 et 50 % par unité de masse.

Les Inertes, éléments à base de matière minérale (sels, verre, cailloux, faïences, charges, encres...) et de métaux (a/ ferreux comme l'acier ; b/ non-ferreux comme l'aluminium, le cuivre, le zinc ou le bronze), constituent l'essentiel des mâchefers et des cendres à l'issue de la combustion. Les déchets ménagers contiennent 15 à 40 % d'inertes par unité de masse, 25-30 % le plus souvent. Cette forte teneur impose en général une combustion prolongée pour éviter la présence d'imbrûlés.

L'Eau contenue dans les déchets correspond à son humidité. C'est un facteur important de la combustion. En effet, l'eau absorbe de la chaleur pour sa vaporisation. Les déchets bruts contiennent 25 à 60 % d'eau (% massique), selon leur origine, la saison, l'état atmosphérique (pluie). Une phase de séchage dans le four élimine cette eau afin d'atteindre la température d'inflammation.

La vapeur d'eau qui se retrouve dans les gaz de combustion provient de l'eau initialement contenue, et de l'association de O et H contenus dans phase organique des déchets.

Composants	% massique	
	Le Goux et Le Douce (1995)	Gemperle et Schebdat, (1999)
Combustible	15-50	30-70
Inertes	15-40 (25-30 le + souvent)	15-40
Eau	25-60	10-35

Tableau 2 : Les 3 composants essentiels des déchets ménagers en rapport avec l'incinération

- **Les mâchefers**

Les mâchefers (parfois appelés scories) sortent à l'état humide des fours à grille. En effet, ils passent à la sortie de four dans un extracteur (décendreur) partiellement rempli d'eau. L'eau assure l'extinction des cendres, qui sortent de la grille à des températures voisines de 400-500°C (Le Goux et Le Douce, 1995). Ainsi, le taux d'humidité des mâchefers est de l'ordre de 18-30 %. Le pH de ces eaux de mâchefers qui est compris entre 10 et 11 dépend du temps de leur carbonatation entre leur extraction et la mesure.

Il existe un lien direct entre le taux d'inertes du déchet entrant et la composition des mâchefers. 90-95 % des inertes se retrouvent en effet sous forme de mâchefers. Parmi les inertes figurent en particulier les métaux ferreux provenant des emballages aciers et les métaux non-ferreux (aluminium, cuivre, zinc,...). Une idée de la composition des mâchefers est donnée tableau 3.

Elément	% sur poids sec	Elément	% sur poids sec
SiO_2	25-50	MgO	2-5
Al_2O_3	11-27	Na_2O	2-4
Fe_2O_3	2-10	K_2O	1-4
TiO_2	0.5-2	P_2O_5	1-6
CaO	10-15		

Tableau 3 : Composition chimique des mâchefers - principaux éléments (d'après Le Goux et Le Douce, 1995)

- **Les fumées**

Les fumées issues de la combustion des déchets sont composées principalement de CO_2 , H_2O , N_2 et O_2 (Tableau 4). La présence de polluants sous forme particulaire (poussières) ou gazeuse (HCl , CO , SO_x , HF , Organo-chlorés, métaux lourds...) rend nécessaire leur épuration avant rejet dans l'atmosphère. Les concentrations moyennes en polluants sont indiquées dans le Tableau 4. Elles dépendent en fait de la nature des déchets, et des conditions de combustion. L'origine des polluants en fonction des produits contenus dans les déchets est détaillée en Annexe 1.

	% volume			mg/Nm ₃	
	a	b		a	b
CO_2	7-12	6-12	<i>Poussières</i>	1500-5000	800-15000
H_2O	12-16		CO	40-100	20-600
N_2	65-68		SO_x	20-200 (SO_2)	200-800
O_2	7-13		HCl	800-2000	400-1500
			HF	0.5-2	2-20
			NO_x		150-400
			<i>Organo-chlorés (PCB, dioxines, furanes)</i>	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-6}$ - $15 \cdot 10^{-6}$
			<i>Métaux lourds</i>	5-10	5-15

Tableau 4 : Composition chimique des fumées d'incinération de déchets ménagers en sortie de four, c'est-à-dire sans traitement (a : Le Goux et Le Douce, 1995 ; b : Di Chirico in Pérez, 1998)

- **Les REFIOM**

Les REFIOM sont les résidus solides séparés lors du dépoussiérage et du lavage des gaz (gâteau de filtration). La composition des résidus de dépoussiérage est fonction de la technique de neutralisation des gaz, et aussi de la composition des ordures ménagères (variations géographiques, origine sociale, période de l'année...); celle du gâteau du filtre presse varie en fonction des rendements de captation du SO_2 et des poussières. Il contient essentiellement du gypse ($CaSO_4 \cdot 2 H_2O$) et des métaux lourds. Dans certains cas, les cendres sous chaudière sont comptées parmi les REFIOM.

En terme de composition, Le Goux et Le Douce rapportent que selon des constructeurs spécialisés le gâteau de filtration comprend : 40 % de poussières, 20 % de gypse, 35 % de chaux n'ayant pas réagi. En fait, les compositions sont très variées d'un REFIOM à l'autre, selon la nature des déchets, les conditions de combustion, les procédés de lavage des fumées... Le tableau 5 décrit la composition chimique d'un REFIOM.

Composés majeurs (%)	Refiom A	Refiom B
SiO ₂	23.46	14.73
Al ₂ O ₃	11.60	7.85
Fe ₂ O ₃	1.67	1.33
MnO	0.08	0.17
MgO	2.62	1.70
CaO	21.23	35.61
Na ₂ O	3.94	traces
K ₂ O	2.52	traces
TiO ₂	1.36	0.91
P ₂ O ₅	1.28	0.91
Perte au feu total	19.63	27.77
	89.39	91.01
Autres (%)		
CO ₂ total	4.16	5.92
S total	3.29	0.82
F	0.29	0.15
Cl	11.89	17.41
Métaux lourds (mg/kg)		
Zn	26 450	5 100
Pb	13 200	2530
Cd	465	107
Hg	25	18

Tableau 5 : Composition chimique de 2 REFIOM. Le Refiom A correspond aux impuretés solides extraites des fumées par filtration (cendres), le Refiom B a été obtenu après neutralisation des fumées (cendres neutralisées) (Rouvier, 1995)

- **Les effluents liquides**

(Le Goux et Le Douce, 1995)

Les effluents résultent du lavage des gaz par voie humide. Ce traitement comprend la neutralisation des gaz (par ajout de solution basique), suivie de la précipitation des métaux lourds (par ajout supplémentaire de base), de la floculation, de la décantation et la filtration par filtre presse. Hormis le gâteau de filtration, le lavage des gaz par voie humide produit donc également un résidu liquide, l'eau de lavage. L'eau de lavage est chargée en chlorures de sels (CaCl₂ : 15-60 g/l).

- **Les rejets gazeux**

Les rejets gazeux après épuration des gaz sont composés de CO₂, H₂O, N₂ et O₂. Ils comprennent également des teneurs résiduelles en polluants sous forme gazeuse ou particulaire : HCl, SO_x, NO_x, CO, dioxines, métaux lourds, poussières. Les teneurs

moyennes en polluants rejetés doivent rester inférieures aux limites fixées par la réglementation.

b) Aspects quantitatifs

Les flux de matière solide sont le plus souvent exprimés en kg de rejet par rapport à une tonne de déchets incinérés. Ils peuvent de ce fait être aisément convertis en % du flux massique. Nous avons utilisé cette conversion dans le tableau 6 pour comparer diverses données sur la répartition des rejets liés à l'incinération des déchets ménagers. Malgré une certaine variabilité, on retrouve en fait des valeurs moyennes cohérentes.

% du flux massique	IAWG, 1995 in Ecke <i>et al</i> , 2000	Le Goux et Le Douce, 1995	Poignant et Miquel, 1999	Di Chirico (in M.Pernot, 1998)
<i>Brûlé</i>	65.8 %			
<i>Mâchefers</i>	30.5 %	25-30 %	27.5-30 %	25-35%
<i>Refiom</i>	3.2 %	2.5-5 %	2-5 %	
<i>condres volantes</i>	2.0 %			2-4
<i>résidus de lavage</i>	1.2 %			0.5-1.5
<i>condres sous chaudière</i>	0.5 %			0.5-1.5

Tableau 6 : Devenir des déchets ménagers lors de l'incinération en four à grille. Les valeurs sont exprimées en % du flux massique

Pour les gaz, une description volumique est nécessaire. Ainsi, Poignant et Miquel (1999) estiment que l'incinération d'une tonne de déchets produit 5 000 m³ de fumées et CO₂.

Les quantités d'effluents liquide rejetés varient en fonction de la concentration du liquide de lavage. Les quantités à traiter sont de l'ordre de 0.15-0.6 m³/tonne d'ordures ménagères.

Il manque dans le bilan des flux volumiques, les consommations d'air et d'eau, qui sont propres à chaque usine et varient dans le temps. La consommation d'eau varie par exemple d'une usine à l'autre selon la présence ou non d'un circuit de recyclage.

2.2.2. Flux d'énergie

Le bilan énergétique d'une usine d'incinération s'appuie sur un bilan calorifique.

Entrée = Déchets + eau + air

Sortie = mâchefers + fumées + condres volantes + eau + pertes

a) Description énergétique des différents produits

• **Les déchets**

La principale caractéristique énergétique des déchets est leur pouvoir calorifique (PC). Le **pouvoir calorifique** est la quantité de chaleur dégagée par la combustion complète d'une unité de masse d'un combustible. Il est dit *supérieur* (PCS) s'il ne comprend pas la chaleur de vaporisation de l'eau contenue dans les produits de combustion, c'est-à-dire sur des produits secs. A titre d'exemple, le tableau 7 indique l'ordre de grandeur des PCS de quelques matières.

Produits	Pouvoir calorifique supérieur (kcal/kg)
journaux, papiers, cartons	4500
textiles	4100
plastiques	4300
paille	3400
sciure de bois	4400
maïs	3500
PVC	4800
pneux	6000-7000
peinture, vernis	4500
polystyrène	9890
polyéthylène	10100
huile usagée	10400

Tableau 7 : Exemple de pouvoir calorifique supérieur de différentes matières contenues dans le déchets (Defrocourt, 1995)

La plupart des matières combustibles ont un PCS autour de 4000 kcal/kg, à l'exception des produits type hydrocarbures (plastiques) qui ont un PCS autour de 10 000 kcal/kg.

Le pouvoir calorifique est dit *inférieur* (PCI) s'il comprend la chaleur de vaporisation de l'eau, c'est-à-dire lorsque son humidité est prise en compte. Il se calcule en déduisant du PCS l'énergie de vaporisation de l'eau (Pernot, 1998).

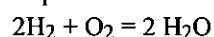
$$PCI = PCS \cdot (1 - H_2O) - C_v \cdot (9H + H_2O)$$

avec H^* : % hydrogène dans le déchet

H_2O : taux d'humidité (% eau)

C_v : chaleur latente de vaporisation de l'eau (550-600 kcal/kg selon la température de vaporisation).

* 9H correspond à la masse d'eau formée à partir de l'hydrogène contenu dans les déchets.



4g 32 g 36 g (masse molaire) => rapport massique de 9

L'unité de mesure du PCI est le kcal/kg ou kJ/kg. La valeur du PCI, indispensable au dimensionnement des fours d'une usine d'incinération, varie bien sûr en fonction de la teneur en eau des déchets. La teneur en plastique a aussi une influence certaine. Ainsi,

l'augmentation relative de la teneur en plastiques des déchets, liée au tri sélectif, engendre une augmentation du pouvoir calorifique des déchets à incinérer. Le PCI moyen de déchets entrant en four à grille est évalué à 2500-2800 kcal/kg (Le Goux et Le Douce, 1995).

Le PCI permet de calculer l'énergie totale produite lors de la combustion, qui est exothermique.

- **L'eau**

L'eau est caractérisée énergétiquement par sa chaleur latente de changement de phase et de sa capacité calorifique

- **Les autres flux**

Les autres flux sont caractérisés énergétiquement par leur capacité calorifique.

3. Modélisation de l'incinération : approches matière et énergie

Dans le cadre de la modélisation de l'incinération des déchets ménagers, il faut prendre en compte de manière simplifiée l'ensemble des opérations unitaires et des flux de matière et d'énergie, et des transformations de la matière. Les approches matière et énergie, bases de la modélisation de l'incinération*, comprennent :

- la description de la matière
- le bilan de masse
- le suivi de la transformation chimique (et physique) de la matière,
- le bilan enthalpique.

Ce chapitre vise à poser les bases théoriques et pratiques relatives à ces trois aspects. Pour cela, il s'appuie sur des données issues d'ouvrages, d'articles ou de brochures de logiciels. Pour plus de détails sur les logiciels, les simulateurs d'incinération sont décrits individuellement en Annexe I.

* Un des objectifs de la modélisation est l'analyse de performance. Les performances concernent par exemple la capacité de transformation des déchets, la teneur en espèces polluantes dans les résidus, le rendement énergétique. Elles sont évaluées à partir des rendements en combustion (taux d'imbrûlés CO, CH_x, Csolide, matières organiques), en épuration (taux de neutralisation) et en filtration (efficacité par rapport à une classe de particules). Un objectif est aussi la prévision des performances. Pour déterminer les teneurs en polluants dans les résidus, il faudra alors suivre le cheminement des éléments polluants introduits dans l'incinérateur jusqu'aux résidus (mâchefers, poussières, fumées).

3.1. DESCRIPTION DE LA MATIERE

Le degré de précision dans la description des déchets conditionne les possibilités de simulation, sachant que les déchets sont souvent mal connus en pratique. Différents niveaux de description peuvent donc être considérés. A cet effet, l'approche de Mulet et Prebende (1991) est intéressante (figure 3).

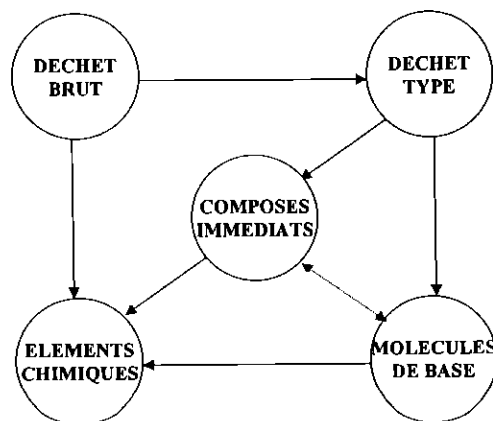


Figure 3 : Description à différents niveaux d'un déchet à incinérer comme utilisé dans le Système Expert développé par la Société Bertin (d'après Mulet et Prebende, 1991).

La modélisation nécessite de prendre en compte un certain nombre de paramètres matière et énergie des déchets comme :

- le débit massique
 - la composition chimique élémentaire (incluant les éléments à caractère polluant)
 - les composants de base, classés en catégories de comportement (combustibles, inertes, eau) ou de matériau (catégories Modecom).
 - la capacité calorifique (PCI)
- et éventuellement les propriétés physiques comme la granulométrie.

Une description de type MODECOM peut s'avérer plus ou moins adaptée : adaptée dans la mesure où il est possible d'approcher le PCI, adaptabilité à vérifier en ce qui concerne la teneur en eau et la possibilité de quantifier et modéliser le devenir des polluants. Des matrices de transformation comme ébauchées dans le Tableau 8 risquent d'être nécessaires.

Classe	Composition	Combustibles	Inertes	Eau
<i>FP<8mm</i>	poussières, cendres, petits bouts de papier, piles-bouton*...	x	xxx	x
<i>FG 8-20 mm</i>	poussières, cendres, petits bouts de papiers, verre...	x	xxx	x
<i>Fermentescibles</i>	alimentaire, jardin	xxx		x
<i>Papier</i>		xxx	x	x
<i>Cartons</i>		xxx	x	x
<i>Composites</i>	emballages en plusieurs matériaux	x	x	x
<i>Textiles</i>	emballages : filets, habits, chiffons en fibre naturelle ou synthétique	xxx		x
<i>Textiles sanitaires</i>	Fibres naturelles ou synthétiques	xxx		x
<i>Plastiques</i>	PE, PP, PVC, PET, PS	xxx	x	x
<i>Combustibles non classés</i>	cageots, boîtes, bois, cuir, caoutchouc, os...	x	x	x
<i>Verres</i>			xxx	x
<i>Métaux</i>			xxx	x
<i>Incombustibles non classés</i>			xxx	x
<i>Déchets spéciaux</i>	Piles*, emballages souillés avec produits organiques	x	x	x
<i>Pertes</i>				x

Tableau 8 : De la description Modecom aux différentes catégories prises en compte dans l'incinération

* La prise d'effet le 1^{er} janvier 2001 du décret sur la gestion des piles usagées sera à prendre en compte.

3.2. BILAN DE MASSE

Le bilan de masse est envisagé à plusieurs échelles :

- globalement sur les flux de matière entrant et sortant de l'usine,

- à l'échelle d'opérations unitaires ou
- spécifiquement sur certains éléments chimiques (polluants notamment).

Dans ce cadre, les paramètres nécessaires à son établissement sont :

- les débits de matière entrant et sortant aux différents niveaux de l'usine (Figure 4).
- les compositions chimiques de ces flux.

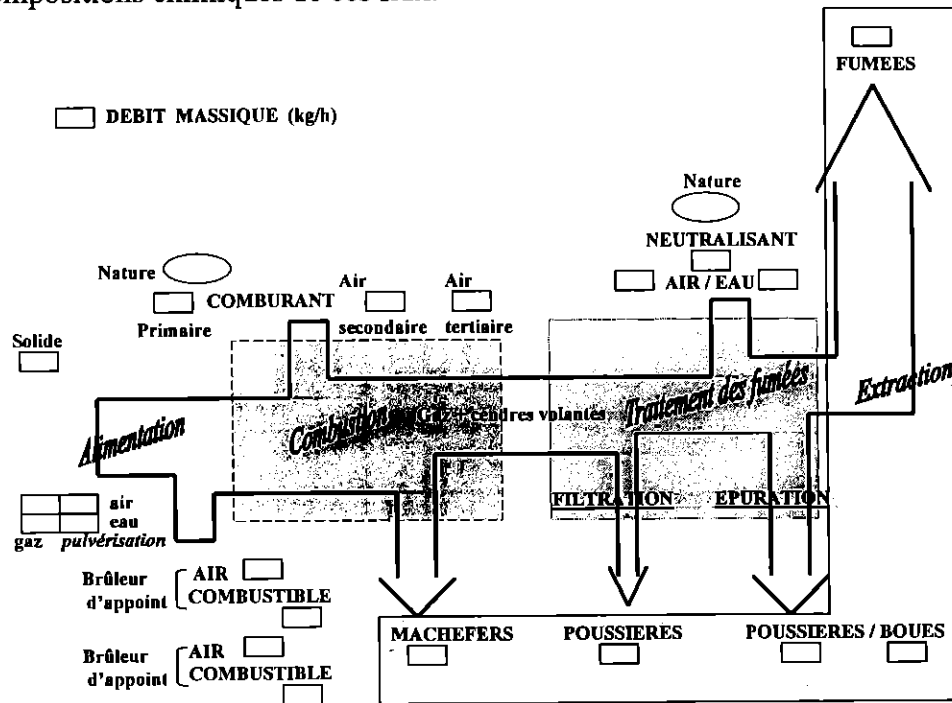


Figure 4 : Données sur les flux nécessaires pour établir un bilan de masse (modifié d'après Mulet et Prebende, 1991)

D'un point de vue théorique, le bilan de masse s'appuie sur le principe de conservation de la matière. Dans le cadre d'un bilan global, Le Goux et Le Douce (1995) proposent l'égalité des masses des éléments entrant et sortant tels que décrits dans le tableau 9.

Masse des éléments entrant	=	Masse des éléments sortant
Déchets ménagers		Gaz sortant de la cheminée
Air* (primaire + secondaire + tertiaire + parasite)		Mâchefers humides extraites
Eau de refroidissement et/ou de lavage (des fumées)		Cendres volantes
+ Eau de refroidissement des mâchefers		Eau rejetée

Tableau 9 : Eléments entrant et sortant d'une usine d'incinération pris en compte pour le bilan de masse d'après Le Goux et Le Douce (1995)

- * - air primaire : introduit sous les grilles pour la combustion des déchets,
- air secondaire de postcombustion : nécessaire à la combustion des imbrûlés gazeux et à un premier refroidissement des gaz,
- air tertiaire : utilisé pour refroidir soit les gaz avant leur lavage, soit les façades latérales des fours,
- air parasite : air pénétrant en tout endroit où l'étanchéité de l'installation est imparfaite, cette dernière étant en dépression.

Dans le cadre d'un bilan élémentaire sur le devenir des métaux pendant la combustion, le refroidissement des gaz et le lavage des gaz, Morf et al (2000) calculent les grandeurs décrites dans le Tableau 10.

Grandeur	Notation	Equation	Paramètres
<i>Flux massique d'un élément i</i>	Fm(i)	$Fm(i) = Fm \times C(i)$	Fm : flux massique de matière C(i) : concentration en élément i
<i>Composition d'entrée</i>		$\frac{\text{somme (Fm(i))}}{Fmo}$	Fmo : Flux massique de matière en entrée
<i>Chaleur du déchet entrant</i>	Eo	Esnc / Fm(mesuré)	Esnc : sortie nette d'énergie de la chaudière
<i>Pertes de chaleur</i>		facteur d'efficacité constant	
<i>Concentration en S du déchet entrant</i>	(S)o	Somme Fm(S) de mâ + cc + cpe + erl	mâ : mâchefers cc : cendres chaudières cpe : cendres de précipitation électrostatique erl : eau résiduelle de lavage
<i>Concentration en HCl des fumées en sortie de four</i>	HCl (fsf)	Somme C(HCl) de cc + erl	
<i>Quantité de cendres</i>		$Fm(\text{cendres}) = \text{Somme mâ} + \text{cc} + \text{cpe}$	en tenant compte de la teneur en eau de ces sorties
<i>Fraction de C organique dans les flux sortants</i>			<2% de leur flux massique, n'est pas considéré dans le calcul
<i>Teneur en poussière des fumées de combustion</i>		$Fm(cc) + Fm(cpe)$	

Tableau 10 : Grandeurs calculées par Morf et al. (2000) pour effectuer un bilan élémentaire sur les métaux lourds lors de l'incinération de déchets ménagers

Le bilan élémentaire s'appuie sur la connaissance de la composition des ordures ménagères, des propriétés individuelles de chaque métal, et sur la mesure de la teneur en eau de la fumée dans la chambre de combustion, de la température de combustion, de la teneur en CO₂ et O₂ des fumées et du flux d'air à la sortie de la chaudière.

3.3. TRANSFORMATION CHIMIQUE DE LA MATIERE

Il est important de connaître les compositions des flux sortant, notamment pour mieux modéliser les impacts environnementaux des rejets. Ces aspects passent par la modélisation de la transformation de la matière : les matières solides (combustibles, inertes) et l'eau subissent des changements d'état et de phase ; leurs éléments constitutifs se distribuent dans les résidus solides, liquides et gazeux.

Comme pour le bilan matière, la transformation chimique peut être appréhendée soit globalement pour l'ensemble de l'usine, soit à l'échelle d'une opération unitaire, avec une approche à l'échelle du composé et/ou de l'élément.

3.3.1. Principales réactions chimiques

La phase organique représente une déterminante de la composition de base des déchets, dont les principaux éléments constitutifs C, H, O, N, S, se répartissent en moyenne comme suit (Le Goux et Le Douce, 1995) :

C : 45-55 %	N : 0.5-1.5 %
H : 5-8 %	Cl : 0.8-1.2 %
O : 35-40 %	S : 0.2-06 %

Au cours de la combustion, la matière organique est détruite par des réactions chimiques. Du fait de l'excès d'air, les réactions d'oxydation (exothermiques) prédominent dans le lit de combustion et dans la phase gazeuse de la chambre de combustion. Les réactions d'hydrolyse, néanmoins significatives, doivent donc être prises en compte également dans le cadre d'une modélisation. Une partie des éléments constitutifs de la matière organique passe en phase gazeuse, comme indiqué dans le Tableau 11 qui présente les réactions d'oxydation avec le carbone, l'hydrogène et le soufre.

C	+	O ₂	=	CO ₂
1 kg		2.66 kg		1.86 Nm ³
2H ₂	+	O ₂	=	2H ₂ O
1 kg		8 kg		11.2 Nm ³
S	+	O ₂	=	SO ₂
1kg		1kg		0.7 Nm ³

Tableau 11 : Principales réactions d'oxydation (d'après Le Goux et Le Douce, 1995)

Une autre partie reste en phase solide, sous forme d'autres composés. C'est le cas d'une partie des métaux, dont l'oxydation produit des oxydes ou hydroxydes stables. Le comportement des métaux est en fait complexe, car chaque métal présente un comportement particulier en fonction de sa température de fusion et de sa capacité à être mobilisé* par des molécules telles que les chlorures. Les métaux sont ainsi décrits comme lithophiles ou volatiles selon la distribution entre phase solide résiduaire (mâchefers, cendres) et phase gazeuse.

* HCl se forme à partir des composés chlorés (H₂ + Cl₂ = 2 HCl), directement pour les composés organochlorés des plastiques, à haute température pour les phases inorganiques de type sel. Le HCl gazeux, de même que les chlorures d'alcalins provoquent la formation de chlorures métalliques. Les échanges d'ions entre sels inorganiques (sels chlorés par exemple) et sels sulfatés de métaux lourds (Zn en particulier) induisent la formation sels chlorés de métaux lourds volatiles et de sels sulfatés (Le Goux, Le Douce, 1995).

3.3.2. Approche thermodynamique chimique

Le calcul thermodynamique considère un ensemble de réactions chimiques à l'équilibre. Il combine l'application de la loi d'action de masse et un bilan de masse par élément. D'après Paoletti *et al.*, (2000), il est impossible de déterminer exactement toutes les réactions chimiques dans la chambre de combustion. En outre, les températures locales, la spéciation des métaux, les concentrations locales des réactifs sont peu ou pas connues et peuvent avoir des valeurs très différentes des valeurs moyennes mesurées. Néanmoins, même si un calcul thermodynamique chimique ne modélise jamais exactement le régime chimique dans la chambre de combustion, il est très utile pour indiquer les réactions les plus probables. Il permet une première approche de la formation théorique et de la stabilité des composés attendus, sous des conditions données (Binner *et al.*, 1995).

3.3.3. Approche cinétique chimique

Du fait que l'équilibre chimique n'est presque jamais atteint dans le procédé de combustion (Paoletti *et al.*, 2000), une approche cinétique chimique peut rendre compte avec plus de précision les phénomènes. Mulet et Prébende (1991) considèrent l'approche cinétique comme indispensable pour rendre compte des transformations chimiques.

Cette approche se heurte aux mêmes difficultés que l'approche thermodynamique : de nombreux paramètres locaux sont inconnus. En outre, l'approche cinétique demande d'approfondir encore plus la connaissance des réactions chimiques (données thermodynamique + vitesse de réaction).

3.3.4. Fonctions de transfert

Une approche simplifiée de la chimie est possible en utilisant des fonctions de transfert, comme le font Sandvik *et al.*, (1999) (tableau 12), qui considèrent la répartition des flux partiels initiaux dans les 3 catégories de rejets : gaz, REFIOM, mâchefers (figure 5).

Entrée	Composants			
	H ₂ O	non comb.	Zn	Hg
Papier	100	<i>10</i>	<i>90</i>	<i>99.9</i>
Plastique	100	<i>10</i>	<i>90</i>	<i>99.9</i>
Nourriture	100	<i>10</i>	<i>90</i>	<i>99.9</i>
Textiles	100	<i>10</i>	<i>90</i>	<i>99.9</i>
Sortie	Gaz	Cendres	Gaz	Gaz

Tableau 12 : Exemple de matrice (données arbitraires en italique) donnant le principe d'une fonction de séparation (d'après Sandvik *et al.*, 1999). La fonction de séparation définit la proportion de chaque composant passant dans une catégorie de rejet (par exemple, 100 % de l'eau contenue dans le papier passe en phase gazeuse).

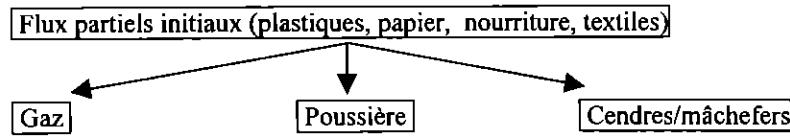


Figure 5 : Répartition des flux partiels initiaux contenus dans les déchets dans les différentes catégories de rejet (d'après Sandvik et al., 1999).

L'approche par fonction de transfert (ou de séparation) s'appuie sur des lois de comportement générales des éléments. Elle intéresse particulièrement les éléments à caractère polluant. La difficulté réside dans la spécificité de chaque élément et de la dépendance de son comportement en fonction des composés du déchet et des paramètres de fonctionnement des fours. Des lois générales peuvent être déduites de la distribution des polluants dans les résidus de l'incinération (tableaux 13 et 14). La distribution des polluants peut elle-même être déterminée à partir des compositions des déchets entrant et des résidus et rejets (tableau 15).

Polluant	Volatilité	Mâchefer	Cendres filtrées	Gâteau de filtration après lavage des gaz
Pb	+	75 +/- 4 %	25 +/- 4 %	-
Cd	+++	8 +/- 2 %	92 +/- 2 %	-
Hg	+++	4 +/- 1 %	51 +/- 6 %	44 +/- 6 %
Cu	-	94 +/- 1 %	6 +/- 1 %	-
Cl	+++	10 %	37 %	54 %

Tableau 13* : Distribution des polluants dans les résidus solides d'incinération des déchets (données de Johnke et al., 1999)

Eléments	Quantité (g/T)	% dans les mâchefers	% dans les cendres	% dans les fumées
Métaux				
Zn	450-2000	50	45	5
Pb	300-1000	60	35	5
Cd	5-12	18	70	12
Cu	400-1100	90	9	1
Hg	3-5	4	6	90
Fe		99	0.08	0.02
Métalloïdes				
C		3	0.1	96.6
S	600-1000	35	25	40
Halogènes				
Cl	7000-12000	10	20	70
F	80-150	35	40	25

Tableau 14* : Répartition estimée des principaux métaux, métalloïdes et halogènes lors de l'incinération des ordures ménagères. (Le Goux et Le Douce, 1995)

Substance	Teneur dans les déchets (g/t de matière sèche)	Teneur dans les mâchefers (en g/t de matière sèche)	Concentration dans les éluants de mâchefers (mg/l)
<i>Pb</i>	500	600-5 200 (1 600)	0.01-0.1
<i>Cd</i>	10	0.1-82 (10)	0.0005-0.01
<i>Hg</i>	4	0.-20 (0.6)	<0.001
<i>Cl</i>	7 500	300-6 300 (2 700)	35-250
<i>Cu</i>	500	200-7 000 (2 200)	0.03-0.3
<i>pH</i>			9.0-11.7
Conductivité électrique ($\mu\text{S/cm}$)			1 000-6 000

Tableau 15* : Comparaison entre la teneur en polluants dans les déchets et dans les mâchefers et éluants (eau de refroidissement) des mâchefers d'incinération - valeurs moyennes entre parenthèse (données de Johnke et al., 1999).

* Ces bilans issus de diverses sources bibliographiques sont donnés à titre indicatif, sans contrôle de fiabilité.

3.4. BILAN ENERGETIQUE

Le bilan énergétique permet d'effectuer un bilan de fonctionnement de l'usine d'incinération. Il s'appuie sur les flux énergétiques liés à la matière. On ne confondra pas ce bilan avec un bilan de la consommation d'énergie des différents appareils ou procédés unitaires, qui permet de calculer un coût de fonctionnement de l'usine.

Le bilan énergétique s'applique sur l'usine ou sur des modules de l'usine : le four et la chaudière sont ainsi considérés séparément par Gemperle et Schebdat (1999) et par Ecobilan (logiciel Wisard par exemple, sur lequel plus de détails sont donnés en annexe 1). C'est en fait un bilan enthalpique, qui nécessite la connaissance de paramètres tels que la température, le pouvoir calorifique, la capacité calorifique, la puissance aux différentes entrées et sorties du système (figure 6).

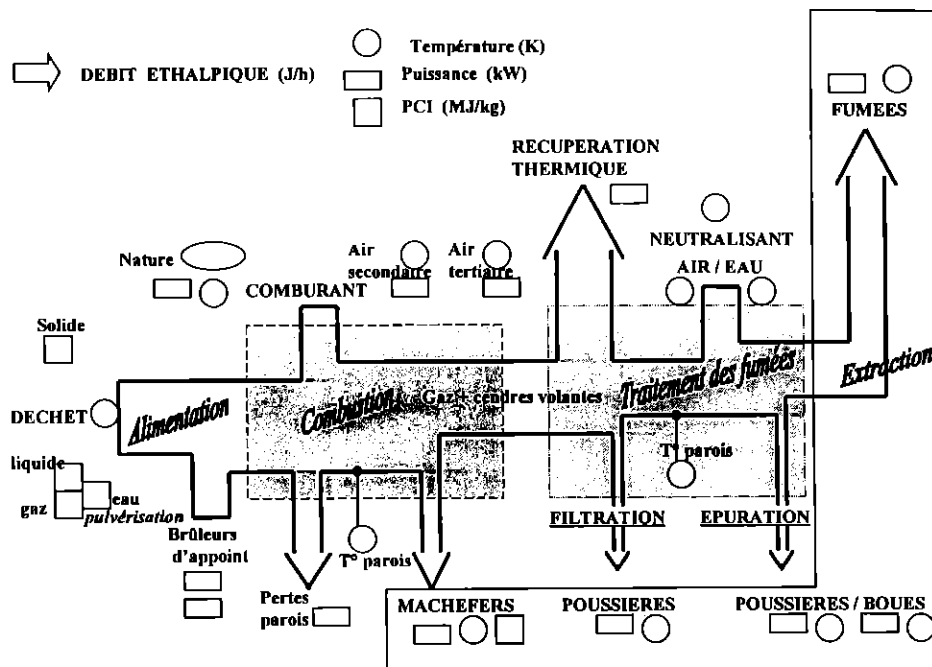


Figure 6 : Paramètres à renseigner dans le cadre du bilan énergétique d'une usine d'incinération (hors chaudière) selon Mulet et Prebende (1991)

D'un point de vue théorique, le bilan énergétique s'appuie sur le principe de conservation de l'énergie. Le bilan énergétique de la combustion est détaillé ci-après ; seuls les grands principes de la récupération d'énergie en chaudière sont abordés.

Combustion

Le Goux et Le Douce (1995) proposent le bilan calorifique suivant pour la combustion :

$$\begin{aligned}
 & (\text{déchets ménagers} \times \text{PCI}) + (\text{air} \times \text{enthalpie}) \\
 & = \\
 & (\text{fumées} \times \text{enthalpie}) + (\text{cendres} \times \text{enthalpie}) \\
 & + \text{pertes thermiques} + \text{pertes par imbrûlés (gazeux et solides)}
 \end{aligned}$$

sachant que :

- l'enthalpie de l'air dépend de sa température et de son hygrométrie,
- l'enthalpie des fumées tient compte de leur composition molaire, de leur température et de la valeur enthalpique de chacun des constituants,
- l'enthalpie des cendres est déterminée par leur chaleur spécifique et leur température.

Ce bilan s'écrit mathématiquement à partir des équations décrites dans les tableaux 16 et 17 : $\sum A_i = \sum B_i$

Grandeur	Notation	Equation	Paramètres
chaleur contenue dans l'ordure ménagère	A1	$A1 = M1 \times PCI$	M1 : débit de déchets en kg/h PCI déchet brut
chaleur contenue dans l'air introduit dans l'incinérateur $A2 = A21 + A22$	A2	$A21 = m1 \times cp1 \times (t1 - ta)$ relatif à l'air primaire $A22 = m1 \times cp2 \times (t2 - ta)$ relatif à l'air secondaire	m : débit d'air (kg/h) cp : chaleur spécifique (kJ/kg°C) t : température de l'air ta : température de l'air ambiant
chaleur véhiculée par l'eau d'alimentation de la chaudière (dans le cas d'un système avec récupération d'énergie)	A3	$A3 = m3 \times H3$	m3 : débit d'eau introduite en chaudière H3 enthalpie de l'eau (kJ/kg)

Tableau 16 : Equations théoriques relatives aux entrées de chaleur dans une usine d'incinération d'ordures ménagères

Grandeur	Notation	Equation	Paramètres
chaleur contenue dans la vapeur	B1	$B1 = m4 \times H4$	m4 : débit de la vapeur produite (kg/h) H4 : enthalpie de la vapeur produite
chaleur des fumées sortant à une température tf	B2	$B2 = m5 \times H5$	m5 : débit des fumées (kg/h) H5 : enthalpie sensible moyenne* des fumées (kJ/kg)
chaleur contenue dans les mâchefers	B3	$B3 = m6 \times cp6 \times (tm - ta)$	m6 : débit de mâchefers (kg/h) cp6 : chaleur spécifique des mâchefers (=0.96 kJ/kg°C) tm : température des mâchefers après extinction (°C)
chaleur contenue dans les cendres volantes	B4	$B4 = m7 \times cp7 \times (tf - ta)$	m7 : débit de cendres volantes (kg/h) cp7 : chaleur spécifique des cendres (=1.04 kJ/kg°C) tf : température des fumées (°C)
pertes thermiques résultant du fonctionnement conjoint du four et de la chaudière**	B5	$B5 = (0.02) \times M1 \times PCI$	
pertes par imbrûlés de carbone	B6	$B6 = m8 \times PCI1$	m8 : débit des imbrûlés PCI1 : pouvoir calorifique inférieur des matières imbrûlées (=29 300 kJ/kg)
chaleur sensible de l'eau éliminée avec les mâchefers	B7	$B7 = m9 \times (tm - te)$	m9 : débit d'eau éliminée tm : température des mâchefers après extinction te : température de l'eau à son entrée dans le dispositif d'extraction
pertes par imbrûlés gazeux***		négligeables	

Tableau 17 : Equations théoriques relatives aux sorties de chaleur dans une usine d'incinération d'ordures ménagères

* enthalpie moyenne = enthalpie des différents composants (CO₂, H₂O, O₂, N₂) en relation avec leur concentration)

** difficilement mesurables en fait

*** constitués essentiellement par du monoxyde de carbone (CO) : négligeables (car le taux de CO dans un four bien réglé < 50 ppm rapportées aux fumées).

Dans le cadre de la modélisation de la combustion, Gemperle et Schebdat (1999) citent un certain nombre de méthodes qu'ils ont utilisées : DIN 1942 ; méthodes de Dittrich, Merz ou Kajauck, équations empiriques de Boie pour le calcul du PCI. Nous ne les décrivons pas ici, mais il conviendrait d'en prendre connaissance.

Récupération d'énergie

Lemoult (1993) propose une modélisation du fonctionnement énergétique des unités de production d'énergie et de chaleur dans une usine d'incinération d'ordures ménagères utilisant la cogénération. Il s'appuie d'une part sur la modélisation des propriétés thermodynamiques de l'eau et d'autre part sur la modélisation des équipements et des réseaux.

3.5. DIFFICULTES PRATIQUES

La mise en œuvre du modèle risque de se heurter à des difficultés pratiques liées à la disponibilité d'informations et aux incertitudes sur ces informations. En terme de disponibilité d'information, le tableau 18 indique les mesures standard effectuées dans les usines d'incinération.

	Flux massique (mass flow)	Débit (flowrate)	Teneur en eau	T	P	Composition chimique
<i>Combustible d'appoint</i>	x		x	x		
<i>Déchets</i>	x					
<i>Fumées</i>		x	x	x	x	x
<i>Air de combustion</i>		x	x	x	x	
<i>Vapeur</i>	x			x	x	
<i>Eau d'alimentation</i>	x			x	x	

Tableau 18 : Mesures standard dans une usine d'incinération (données de Gemperle et Schebdat, 1999) - T : Température ; P : Pression.

En terme d'incertitude sur les paramètres, on citera le cas du PCI. En effet, comme le mentionnent Gemperle et Schebdat (1999), le PCI est souvent déterminé indirectement sur la base du bilan thermique de l'usine d'incinération. Ceci peut donc poser des problèmes lorsqu'on veut dimensionner un ensemble par exemple. Les mesures directes de PCI sont très complexes et utiles si elles sont déterminées sur une longue période de temps ou à partir d'un grand nombre de mesures. Comme cette situation est rare, les mesures, qui ont néanmoins en général un degré de confiance raisonnable, sont en général associées à des données empiriques de la littérature pour déterminer le PCI (Gemperle et Schebdat, 1999). Gemperle et Schebdat (1999) décrivent l'exemple suivant de données sur l'incinération utilisées pour un dimensionnement :

C/H du fuel : 7.5

Pertes par radiation : 1-2 %

Imbrûlés : 2% dans les cendres/mâchefers (selon l'efficacité du four)

T° des mâchefers : 600°C

T° du four : 1100°C (adiabatique)

Le Goux et Le Douce (1995) citent une autre méthode de détermination du pouvoir calorifique des déchets, utilisée dans l'évaluation des bilans masse-énergie : le pouvoir calorifique du combustible est calculé à partir d'une composition résultant d'analyses moyennes effectuées sur un grand nombre d'échantillons.

Il est également difficile de doser convenablement le rapport air-combustible, à cause de la variabilité du pouvoir calorifique lié à l'hétérogénéité de composition et/ou à la variation de compacité des déchets (Le Goux et Le Douce, 1995).

En outre, les temps de combustion, la production de chaleur, la qualité des émissions varient en fonction de la densité des déchets, de leur degré d'humidité, de leur pouvoir calorifique.

3.6. EXEMPLES DE COMBINAISON DES APPROCHES MATIERE ET ENERGIE

A titre d'illustration des chapitres précédents, le tableau 19 présente la combinaison d'approches matière et énergie utilisée par l'outil d'incinération du logiciel Ecobilan (Muller *et al*, 1997).

Calcul	Base de calcul	Résultats
1/ Bilan massique	Réactions chimiques - Oxydation : . C=>COx*, H=>H ₂ O**, S=>SOx* . dans une moindre mesure N=> NOx, N ₂ O (air et déchets) - Cl => HCl* - F => HF*	
2/ Entrée d'air du four	Oxygène stoechiométriquement nécessaire à l'oxydation de tous les éléments Excès d'air	Quantité d'air minimale utilisée pour obtenir l'excès d'air défini initialement *
3/ Bilan thermique	Energie émise par la combustion à partir PCI utile + énergie de l'air comburant = Energie des gaz + mâchefers + cendres volantes* (avec température de sortie fixée par l'utilisateur). Pertes thermiques du four prises en compte.	Bilan non bouclé : - Ajustement de l'excès d'air, ou - Ajout de combustible d'appoint (dont le PCI permet d'atteindre équilibre thermodynamique) => Puis retour à 1/ Bilan massique Bilan bouclé : => autres étapes de l'usine

Tableau 19 : Modélisation du four : enchaînement des calculs et résultats obtenus

* Données précisées par l'utilisateur : quantités C et S transformées en CO₂ et SO₂, quantités de Cl et F transformées en HCl et H, excès d'air initial

**L'hydrogène des déchets est supposé réagir entièrement avec l'oxygène de l'air et des déchets et se transformer en vapeur d'eau.

Conclusion

Nécessaires à la modélisation de l'incinération par analyse de procédés, les approches matière et énergie s'appuient sur un certain nombre de paramètres et de calculs tels que décrits dans le tableau 20.

Paramètres d'entrée	Paramètres de sortie	Calculs	Procédé	Objectif
Déchets : - Débit massique - Composés - Composition chimique élémentaire - PCI - Températures Air, Eau : - Débit - Température - Chaleur spécifique	Fumées, gaz traités, mâchefers, REFIOM : - Débit massique ou volumique - Composition chimique élémentaire - Chaleurs spécifiques ou enthalpies - Températures Vapeur (chaudière) - Débit - Température - Enthalpie	Bilan matière Transformation / transfert de la matière Bilan enthalpique	Four Traitement des fumées Chaudière	Evaluation ou prévision des performances : matière, énergie, environnementale

Tableau 20 : Paramètres et calculs (non exhaustifs) intervenant dans la modélisation de l'incinération en vue de l'évaluation ou la prévision des performances matière, énergie et environnementale.

Le degré de précision à prévoir dans la description de la matière et le type d'approche des transformations et transferts de matière seront dépendants des objectifs en terme de modélisation. Ainsi, le simulateur développé dans le cadre du projet AWAST doit permettre une approche environnementale. Il conviendra donc au début du projet de se mettre d'accord avec les partenaires et le comité de pilotage sur la précision de cette analyse environnementale dans le cadre de l'incinération. S'il s'agit simplement de connaître la composition chimique élémentaire des rejets, de simples fonctions de transfert des polluants dans les différentes étapes de l'incinération suffiront. En revanche, s'il s'agit de déterminer également la composition minéralogique des mâchefers en particulier (cf. tests de lixiviation), il faudra appliquer un calcul chimique thermodynamique (voire cinétique). A cet effet, il faut bien garder en mémoire les limites d'une telle approche, liées à la méconnaissance des conditions locales dans le four.

Bibliographie

- S. Binner, L. Gaoletti, F. Lombardi, E. Mogensen et P. Sirini (1995) Mass Balance and Heavy Metals Distribution in Municipal Solid Waste Incineration. XIth International Conference on Solid Waste Technology and Management, Philadelphia, USA, 12-15 nov. 1995, Vol 5 C 2.
- S. Defrocourt (1995) Automatisation d'un poste de pontier dans une usine d'incinération d'ordures ménagères, Thèse de doctorat, Université Technologique de Compiègne, p.44.
- H. Ecke, H. Sakanakura, T. Matsuto, N. Tanaka et A. Lagerkvist (2000) State-of-the-art treatment processes for municipal solid waste incineration residues in Japan, *Waste Management and Research*, 2000:18, p.41-51.
- H. Gemperle et K. Schebdat (1999) Indirect calculation of Municipal Solid Waste Heating Values and Compositions for Incineration Plants, *UTA International*, n°2, p.66-72.
- B. Johnke, P-G. Mast et M. Beckmann (1999) Impact of Closed Substance Cycle Management on Thermal Waste Treatment, *UTA International*, volume 1, p.36-44.
- J.Y. Le Goux et C. Le Douce (1995) L'incinération des déchets ménagers, Edition ECONOMICA, 49, rue HERICART, 75015 Paris, pp.159.
- B. Lemoult (1993) Prototype de logiciel de simulation du fonctionnement d'une usine d'incinération d'ordures ménagères utilisant la cogénération, Rapport ADEME-Ecole Nationale Supérieure des Techniques Industrielles de Nantes, Réf ADEME 92-04-0097, 29 p.
- C. Morf, P. Brünner, S. Spaun (2000), Effect of operating conditions and input variations on the partitioning of metals in a municipal solid waste incinerator, *Waste Management and Research*, p.4-15.
- J.C. Mulet et C. Prebende (1991) Système expert pour l'incinération des déchets, Document Bertin n° DT 58 91/18, Congrès « Innovation, progrès industriel et environnement, Strasbourg, 4-6 juin 1991.
- O. Muller, M. Boidot-Forget, X. Clayeux (1997) *Environnement et Technique*, n°165 (avril), p.49-54.
- F. Paoletti, H. Seifert, J. Vehlow, P. Sirini (2000) Oxianions forming elements in waste combustion - partitioning of antimony, *Waste Management and Research*, n°18 ; p.141-150.

- S. Pérez (1998) Le traitement des polluants générés par les usines d'incinération, rapport de stage de l'EPFL, mai 1998.
http://dgrwww.epfl.ch/GS/genie_san/res_wa/sp.html
- M. Pernot (1998) Rapport de stage de l'EPFL, mai 1998
http://dgrwww.epfl.ch/genie_san/res_wa/M_Pernot.html
- G. Poignant et S. Miquel (1999) Les techniques de recyclage et de valorisation des déchets ménagers et assimilés, Rapport de l'Assemblée Nationale n°1693 et du Sénat n°415, pp.338.
- F. Rouvier (1996) Synthèse bibliographique sur les résidus d'épuration des fumées d'incinérateurs d'ordures ménagères (REFIOM), Rapport ANTEA n°A03974, pp.117.
- K. Sandvik, J. Villeneuve, M.-V. Durance et H. Védrine (1999) Development of a mineral processing program as a tool for optimal decisions in waste management, Proceedings of the Global Symposium on Recycling, Waste Treatment and Clean Technologies, Rewas'99, p.

A N N E X E S

ANNEXE 1

Origine des polluants présents dans les fumées d'incinération des déchets ménagers

- La concentration en poussières dépend de la nature des déchets, de leur teneur en inertes et en fines, et des conditions de combustion.
- La concentration en acide chlorhydrique varie en fonction de la nature des déchets, et notamment de leur teneur en plastique (PVC en particulier). Une autre partie des émissions d'HCl provient du chlore minéral (chlorure de sodium, papier, végétaux, bois), qui subit des réactions catalytiques en présence de silice et d'alumine. Sur 7 à 12 kg contenus en général dans une tonne d'ordures ménagères, environ 70 % est émise sous forme d'HCl. 10 % restent dans les mâchefers et 20 % dans les cendres.
- Les SOx proviennent le plus souvent de l'incinération des plâtres et des panneaux muraux. Il s'agit de essentiellement de SO₂ (environ 90 %), SO₃ étant produit en plus faible quantité (de l'ordre de 10 % des SOx) et plus facile à traiter.
- Les métaux lourds (Pb, Zn, Cd, Sn, Hg) proviennent des piles (Cd, Zn, Hg), des plastiques (pigments, stabilisateur au Cd), des cuir et caoutchouc (Cr, Zn), des peintures et enduits (de moins en moins riches en Cu, Zn, Cd).
- La formation de NOx est liée en théorie à l'oxydation de l'azote de l'air. D'autres origines sont néanmoins soupçonnées.
- Les dioxines et furanes apparaissent après la combustion entre 250 et 400°C, par recombinaison à partir des imbrûlés dans les cendres volantes. Leur formation est influencée par la concentration en oxygène et en sels organiques. Le Cu (III) joue le rôle de catalyseur.

Catégorie	Substance	Provenance
<i>Poussières</i>	suie, cendres, sel	tous les déchets
<i>Gaz</i>	HCl	PVC, sel de cuisine (NaCl)
	SO ₂	Papier, colorant, boue d'épuration, caoutchouc
	HF	isolants, Téflon, sprays, réfrigérants
	NO ₂	Textiles, nylon, protéines, réactions secondaires
	HBr	Composants électroniques, tissus ininflammables
<i>Métaux lourds</i>	Pb	Piles*, peintures, rideaux
	Zn	Piles*, peintures, produits zingués
	Cd	Piles*, tissus synthétiques, encres
	Hg	Piles*, thermomètres, amalgames
<i>Composés organiques</i>	Dioxines	Copeaux de bois, réactions secondaires, aliments

Tableau A1.1 : Sources des polluants des fumées (Di Chirico, in S.Pérez, 1998)

* La prise d'effet le 1^{er} janvier 2001 du décret sur la gestion des piles usagées sera à prendre en compte.

Polluant	Produit	Concentration (mg/kg de matière sèche)
<i>Plomb</i>	Métaux non-ferreux	7 350-15 900
	Batteries	4 300-17 300
	Déchets de broyage	940-9 400
	Céramiques	30-3 970
	Verre	170-628
	Plastiques	40-602
	Tubes fluorescents	488-504
	Déchets fins	9.2-407
<i>Cadmium</i>	Circuits imprimés de déchets d'électronique	326-395
	Déchets de broyage	23-300
	Plastiques	21-151
	Tubes fluorescents	90.5-116
	Batteries	51.9-55.1
	Peintures	50
	Cuir/caoutchouc	5-70
	Revêtement de sol	0.3-44.7
<i>Mercur</i>	Déchets fins	1-4.3
	Tubes fluorescents	512-566
	Batteries	122-132
	Circuits imprimés de déchets d'électronique	17
	Déchets de broyage	6
<i>Chlore</i>	Papier/carton	0.1-3
	Déchets de broyage	230 000-4 500 000
	Plastiques	16 084-63 000
	Batteries	16 000
	Cuir/caoutchouc	13 500-49 700
	Papier/carton	1 100-6 100
	Déchets fins	1 300-3 800
<i>Cuivre</i>	Textiles	2 700
	Circuits imprimés de déchets d'électronique	29 880-44 900
	Métaux non-ferreux	25 200-248 000
	Métaux ferreux	222-15 800
	Déchets de broyage	3 200-12 000
	Batteries	910-2 470
Tubes fluorescents	4 550-4 630	

Tableau A1.2 : Concentration en polluants dans des fractions sélectionnées de déchets municipaux (Johnke et al, 1999)

B. Johnke, P.-G. Mast, M. Beckmann (1999) Impact of closed substance cycle Management on Thermal Waste Treatment, UTA International, n°1, p.36-44.

Pour plus d'informations, consulter le rapport : Influence of waste composition on pollutant content and quantity in combustion residues, phase I, du projet de recherche UFO-PLAN, FKZ 103 10 903. Le rapport II, de même titre, et de référence FKZ 103 10 903/01 devrait présenter de l'intérêt également.

ANNEXE 2

Simulation de l'incinération des déchets : logiciels et feuilles de calculs

Un certain nombre de logiciels ou feuilles de calcul permettant une simulation de l'incinération des déchets existent. Il s'agit d'une part de logiciels de dimensionnement/optimisation ou d'outils de formation à la conduite d'usine d'incinération. Il s'agit d'autre part de logiciels plus généraux de gestion globale des déchets ménagers comme Wisard (Ecobilan). Le tableau A2.1 présente les principaux logiciels dédiés à l'incinération dont nous avons connaissance à ce jour. Les logiciels les plus avancés s'appuient sur des bilans de matière et d'énergie.

Nom du simulateur	Bilan matière	Bilan énergie	Référence
<i>I.C.E</i>		x	I.C.E. AG (Gemperle et Schebdat, 1999)
<i>Lexic</i>	x	x	Sté Bertin
<i>Swift</i>	x	x	Sté Bertin
<i>Usim Pac</i>	x		Sandvik et al, 1999
<i>Cogene</i>	x		EDF
	x	x	Le Goux, Le Douce, 1995
		x	B.Lemoult, EMNantes
<i>Incinération - Wisard</i>		x	Sté Ecobilan

Tableau A2.1 : Principaux simulateurs dédiés (ou comprenant des modules dédiés) à l'incinération des ordures ménagères, s'appuyant sur des bilans matière et/ou énergie

A partir des descriptions fournies dans la littérature ou dans des brochures sur un certain nombre de ces logiciels, nous proposons de dégager les informations potentiellement utiles au développement du module incinération du projet AWAST, en terme notamment de méthodologie, paramètres et hypothèses pris en compte.

a) I.C.E. AG (Gemperle et Schebdat, 1999)

Le programme informatique développé par ICE AG (Gemperle et Schebdat, 1999), utilise un **bilan de chaleur** pour simuler le **système de combustion**. Le bilan s'appuie sur plusieurs théories : DIN 1942 ; méthodes de Dittrich, Merz ou Kajauck, équations empiriques de Boie pour le calcul du PCI.

Il permet un calcul intégré sur les différentes parties du procédé : four, chaudière, économiseur avec possibilité de prendre en compte la recirculation de gaz. Il offre la possibilité de faire varier tous les paramètres d'entrée et de sortie, et d'effectuer des simulations directes ou inverses.

Le programme équilibre les données et résout les équations en tenant compte du taux de production de vapeur ou de la température de four indiqués par l'opérateur. Il effectue plusieurs itérations en différents endroits du système.

Méthodologie et hypothèses de calcul :

- Les apports d'air (avec préchauffage ou non) influent directement sur la *température du four*.
- La *composition du gaz*, le *pouvoir calorifique* (formule empirique de Boie), l'*apport de chaleur à l'incinération* et la *demande en air* sont calculés à partir de l'analyse finale/absolue du combustible.
- La *teneur en eau des fumées* est déterminée à partir de l'humidité des déchets, de l'eau formée par combinaison de l'hydrogène contenu dans les déchets, de l'eau provenant de l'humidité atmosphérique (cf injection d'air), de la vapeur générée par l'évaporation de l'eau lors du refroidissement des mâchefers, ou de l'eau provenant du système d'injection de vapeur pour l'ammoniaque.
- La *teneur en carbone imbrûlé* est défini à la fois par la quantité et le résidu où il se trouve (mâchefers, cendres, fumées).
- Les *pertes de chaleur par radiation* de la chambre de combustion peuvent être définies soit comme un pourcentage de la quantité de chaleur transformée, soit directement par une quantité.
- La progression de l'incinération est calculée en conditions adiabatiques, et inclue l'air secondaire, tertiaire et de refroidissement.
- Un **bilan séparé** est calculé **pour la chaudière**. Il prend en compte la température et la composition des fumées, les données d'alimentation en eau, le taux de production de vapeur et les paramètres de la vapeur.
- Les *pertes par les fumées* sont calculées à partir de la pression partielle des constituants de la fumée et de l'intégrale des chaleurs spécifiques aux températures appropriées.

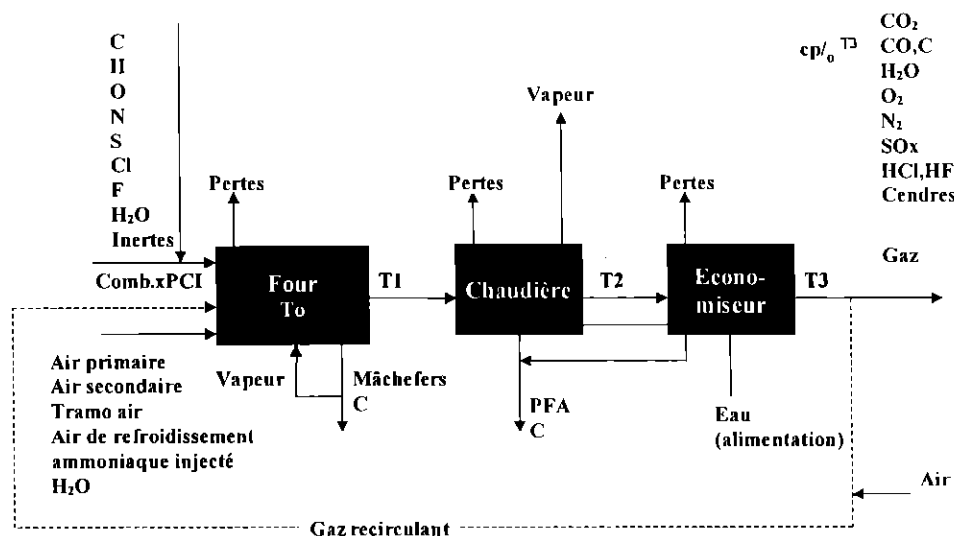


Figure A2.1 : Diagramme schématique du programme ordinateur (Gemperle et Schebdat, 1999)

Variables	Paramètres	Calculs	Utilisation résultats
Déchets - PCI - Composition	Température - atmosphérique - four - Chaleur spécifique	Température préchauffage four Composition des fumées Demande en air Débit des fumées	Prédictions : - adaptations à prévoir sur le système - modifications du mode opératoire - ajustements au budget de maintenance Tests d'acceptation Analyses absolues/finales ? indirectes des déchets incinérés (PCI, teneur en eau)

Tableau A2.2 : Calculs effectués dans le cadre des bilans énergétiques réalisés par le programme de Gemperle et Schebdat (1999).

b) Outil Incinération d'Ecobilan (Muller, Boidot-Forget, Clayeux, 1997)

O. Muller, M. Boidot-Forget, X. Clayeux (1997) Environnement et Technique, n°165 (avril), p.49-54.

+ <http://www.ecobalance.com>

Entrée	Procédés de traitement	Sortie
Arrivée déchets	Four	Mâchefers
Arrivée des carburants	(à grille, tournant ou rotatif)	Cendres
Arrivée de l'air comburant	Valorisation énergétique	Eaux résiduaires
	Traitement des fumées (dépoussiérage, lavage voie humide, sèche ou semi-humide)	Cheminée (fumées)
	Traitement des eaux	
	Echangeurs	

Tableau A2.3 : Flux d'entrée et de sortie autour des opérations unitaires composant l'usine d'incinération dans le logiciel Wisard.

Méthodologie

Le bilan s'appuie sur un **inventaire des flux physiques à chaque étape du procédé et aux bornes de l'usine**

Données d'entrée	Données accessibles après calcul	Objectifs
Description des déchets <i>- fractions, ou</i> <i>- composition élémentaire et</i> <i>capacité calorifique</i>	Consommation de carburant et d'air pour la combustion Consommation de réactifs (lavage des gaz)	ex : - analyser l'influence de la composition des déchets sur celle des fumées et des déchets solides générés
Description des installations techniques de l'usine <i>Paramètres physico-chimiques de chaque étape</i>	Rejets gazeux et liquides Composition des fumées, mâchefers, cendres	- intégrer l'étape d'incinération dans l'analyse du cycle de vie (ACV) d'un produit.
Données économiques	Analyse coût bénéfice Ferraille et aluminium récupérés Quantité de vapeur, d'électricité	

Tableau A2.4 : Données calculées à partir des données d'entrée dans le logiciel Wisard

- La saisie de données (environnementales, économiques) se fait par l'intermédiaire de **boîtes à outil**, en utilisant ou modifiant les **bases de données** existantes. Ces bases de données sont relatives aux fractions des déchets, aux données physico-chimiques des fractions de déchets, aux réactions chimiques notamment.
- Dans un premier temps, un calcul préliminaire vérifie les données d'entrée en terme de cohérence de description de site.
- Ensuite, le logiciel calcule étape par étape de toutes les consommations, toutes les sorties (mâchefers, ferraille et aluminium récupérés, cendres, eau de lavage, vapeur, électricité...) y compris la composition des gaz à chaque étape de lavage et à la cheminée

Unités : débit massique, concentration, pourcentage volumique ou massique de flux

Exemple du four

- Equations thermodynamiques pour les étapes du four et la valorisation énergétique

Principe du bilan énergie du four :

$$\boxed{\text{Energie (déchets + carburants + air comburant)}} = \boxed{\text{Energie (fumées + mâchefers + cendres)}}$$

- Entrée :
 - Composition déchets
 - Paramètres du four : températures des fumées, température des mâchefers, taux de pertes thermiques..
 - Formules de variation de la capacité calorifique des gaz en fonction de la température

- Inconnues : - Quantité d'air
- Quantité de carburant
- Algorithme de calcul itératif

Calcul	Base de calcul	Résultats
<i>1/ Bilan massique</i>	Réactions chimiques - Oxydation : . C=>CO _x *, H=>H ₂ O**, S=>SO _x * . dans une moindre mesure N=> NO _x , N ₂ O (air et déchets) - Cl => HCl* - F => HF*	
<i>2/ Entrée d'air du four</i>	Oxygène stoechiométriquement nécessaire à l'oxydation de tous les éléments Excès d'air	Quantité d'air minimale utilisée pour obtenir l'excès d'air défini initialement *
<i>3/ Bilan thermique</i>	Energie émise par la combustion à partir PCI utile + énergie de l'air comburant = Energie des gaz + mâchefers + cendres volantes* (avec température de sortie fixée par l'utilisateur). Pertes thermiques du four prises en compte.	Bilan non bouclé : - Ajustement de l'excès d'air, ou - Ajout de combustible d'appoint (dont le PCI permet d'atteindre l'équilibre thermodynamique) => Puis retour à 1/ Bilan bouclé : => autres étapes de l'usine

Tableau A2.5 : Modélisation du four : enchaînement des calculs et résultats obtenus

* Données précisées par l'utilisateur : quantités C et S transformées en CO₂ et SO₂, quantités de Cl et F transformées en HCl et H, excès d'air initial

**L'H des déchets est supposé réagir entièrement avec l'oxygène de l'air et des déchets et se transformer en vapeur d'eau.

c) Bertin

- Lexic

Développé par Bertin technologies, Lexic est à la fois un gestionnaire de base de données et un logiciel. D'après la brochure présentation du logiciel, il permet :

- de **formaliser et stocker** des **connaissances** acquises sur les combustibles et les déchets
- d'**évaluer les performances** d'une installation existante en établissant des bilans de masse, d'énergie et d'espèces des composants de l'installation (expertise d'une unité)
- de **dimensionner ou concevoir** de nouveaux incinérateurs ou d'expertiser des équipements existant en déterminant les paramètres de fonctionnement (ex : débit d'air pour obtenir une température de gaz choisis),
- d'**étudier l'influence** de certains **paramètres** choisis sur les conditions de fonctionnement d'un procédé d'incinération (ex : suivre l'évolution des paramètres de conduite d'une installation - débit de combustible, d'air, composition des gaz-, évolution qui peut être induite par la modification du type de déchet/combustible).

Son architecture est basée sur le **couplage** entre un **système de gestion de bases de données relationnelles** OMNIS 7 et des **codes Fortran** pour un environnement de micro-ordinateur type PC :

- Les bases de données décrivent les produits combustibles élémentaires et les déchets, en terme de composition atomique, analyse immédiate (humidité, matières volatiles, carbone fixe), composition des inertes, PCI, données thermodynamiques.
- Les modules de calcul Fortran permettent de caractériser un mélange de combustible ou de déchets, et de déterminer des bilans de masse, d'énergie et d'espèces d'une installation de combustion ou d'incinération à un ou deux étages en défaut ou excès d'air. Le tableau A2.6 présente les différents modules développés.

MODULE	ENTREES	CALCUL	SORTIES
MELANGE	-données relatives aux composés élémentaires - Fractions massiques des composés élémentaires	Règles de proportionnalité (sauf t° de changement de phase)	Caractéristiques du mélange (composition atomique, analyse immédiate ?, PCI, t° de changement de phase, inertes)
COMBUSTION	- Caractéristique du mélange (voir MELANGE) - Facteur d'air, T° comburant, Taux de carbone fixe oxydé, débit et T° diluant, puissance d'appoint	Résolution itérative des bilans d'espèces, d'équilibres chimiques, du bilan thermique (défaut ou excès d'air)	- Composition et t° des gaz - Puissance d'appoint
EQUIL	Idem COMBUSTION pour deux chambres en série	Minimisation de l'enthalpie libre	Composition (27 espèces y compris polluants) et t° des gaz
APPOINT	- Type d'appoint (air plasmagène, brûleur avec combustible donné) - Puissance d'appoint	Bilan thermique	Débit de gaz nécessaire (rebouclage avec combustion)
TEMPS CARACTERISTIQUES	- Nature des déchets (liquide ou solide) - Diamètre des particules - T° ambiante - Propriétés thermiques	Conduction en milieu sphérique Corrélation avec vaporisation	Temps de volatilisation et de vaporisation Evaluation des temps de séjour
PULVERISATION	- Caractéristique du liquide - Diamètre injecteur - Pression d'alimentation, vitesse gouttes - Caractéristiques injecteur	Corrélation empirique	Taille des gouttes

Tableau A2.6 : Modules de calcul du logiciel de simulation d'incinération Lexic

- **Corys t.e.s.s.**

Corys t.e.s.s. est un simulateur pédagogique du fonctionnement et de la conduite des UIOM, adapté plus particulièrement aux fours à grille. Parmi ses fonctionnalités figurent la visualisation du fonctionnement du procédé et le bilan matière, thermique, électriques... du procédé. Ces deux fonctionnalités permettent notamment d'obtenir une meilleure l'exploitation de l'unité, en :

- paramétrant l'installation selon ses données, puis en simulant et visualisant les données en sortie,
- testant de nouvelles configurations avant de les implanter sur site, en prédisant le comportement de l'unité, avec divers types de déchets par exemple.

L'unité d'incinération générique simulée est représentée au travers des 3 modules décrits dans le tableau A2.7.

Module	Description
<i>Four/chaudière</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Alimentation par poussoir - Four à grille avec circuits d'alimentation en air et brûleurs d'appoint - Chaudière de production avec circuits d'alimentation en eau et d'évacuation vapeur - Système de commande des principales boucles de régulation
<i>Traitement des fumées</i>	Choix entre <ul style="list-style-type: none"> - voie humide - voie sèche - voie semi-sèche et semi-humide - système de contrôle/commande avec les principales boucles de régulation
<i>Production d'électricité</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Turbine vapeur - Soutirage - Condenseur - Alternateur connecté à un réseau de type infini - Système de contrôle/commande avec les principales boucles de régulation.

Tableau A2.7 : Description des modules du simulateur pédagogique d'incinération Corys t.e.s.s.

d) Usim-Pac (Sandvik et al, 1999)

Pour modéliser l'incinération des déchets avec le logiciel Usim Pac, Sandvik et al. (1999) ont pris en compte les flux partiels des matériaux contenus dans le déchet, afin d'individualiser les sources de polluants (métaux lourds notamment). Ces flux partiels sont modélisés pour chaque opération unitaire du procédé. Le bilan matière est réalisé grâce à l'aptitude d'Usim Pac à gérer les calculs matriciels.

Modèle de combustion

1/ Séparation hypothétique des inertes (verre, métaux ne réagissant pas), avec réactions chimiques minimales.

2/ Combustion à proprement parler, où de l'air est ajouté. Le carbone et l'hydrogène réagissent pour former du CO₂ et de l'H₂O.

Les substances volatiles tels que l'eau et le mercure sont évaporées et entrent dans la phase gazeuse.

3/ Emission mécanique de la poussière

Flux 1 vers mâchefers,

Flux 2 vers filtration des poussières,

Flux 3 vers lavage des fumées.

Gestion de la transformation des phases

- Phases définies

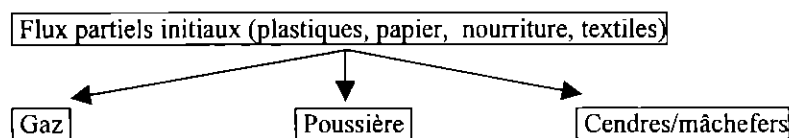


Figure A2.2 : Phases d'entrée et de sortie définies par Sandvik et al., dans le cadre de l'approche matière de la modélisation de l'incinération

- Fonctions de séparation

Fonctions mathématiques ou % de chaque composant du flux d'alimentation dans un flux de sortie.

Entrée	Composants			
	H ₂ O	non comb.	Zn	Hg
Papier	100	<i>10</i>	<i>90</i>	<i>99.9</i>
Plastique	100	<i>10</i>	<i>90</i>	<i>99.9</i>
Nourriture	100	<i>10</i>	<i>90</i>	<i>99.9</i>
Textiles	100	<i>10</i>	<i>90</i>	<i>99.9</i>
Sortie	Gaz	Cendres	Gaz	Gaz

Tableau A2.8 : Exemple de matrice (données arbitraires en italique) donnant le principe d'une fonction de séparation

Pour les métaux lourds, Sandvik *et al.* (1999) soulignent l'importance de séparer les flux de verre et de papier et plastique. En effet, le zinc contenu dans le verre se retrouvera dans les mâchefers car le verre n'est pas combustible. En revanche, le zinc contenu dans les papiers ou plastiques est transféré en majorité dans la phase gazeuse.

Données d'entrée

- masse et composition de chaque catégorie du déchet,
- fonctions de séparation décrivant chaque élément du procédé de traitement.

Problèmes

- difficulté d'échantillonnage liée à l'hétérogénéité des déchets
- La quantité de carbone et d'hydrogène nécessaire pour effectuer un bilan complet n'est en général pas analysé. Il doit être estimé en s'appuyant sur le pouvoir calorifique, la teneur en eau, la perte au feu, et autres données

Modèle d'usine d'incinération

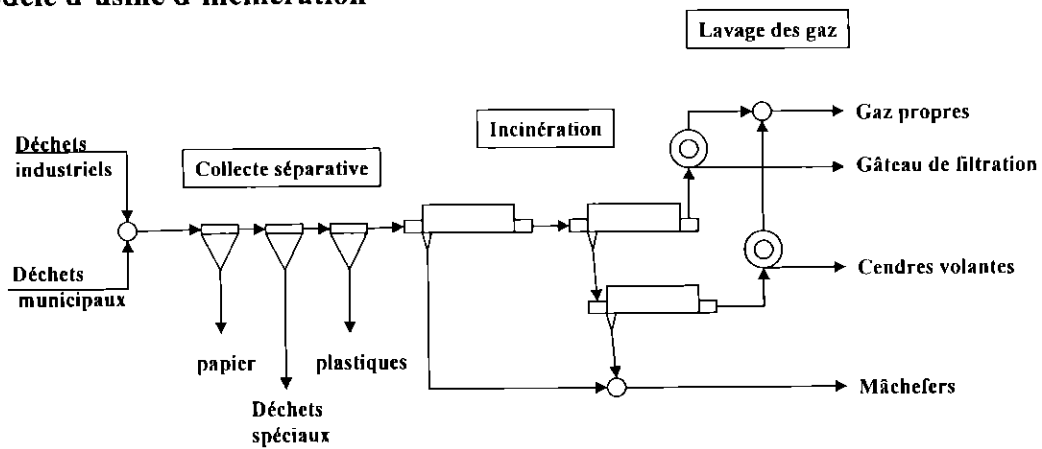


Figure A2.3 : Fractionnement des opérations unitaires dans le cadre de la modélisation de l'incinération des déchets sous Usim Pac (Sandvik et al., 1999).