

Besoins en recherche pour la gestion des déchets

■ P.H. BRUNNER¹, M. BECKMANN², M. BORN³, J.-M. MÉRILLOT⁴, J. VEHLLOW⁵

1. Objectifs de la gestion moderne des déchets

Le métabolisme des économies modernes se caractérise par de fortes augmentations des flux matière, par des stocks gigantesques et croissants de ces mêmes matériaux, et par des flux qui sont surtout linéaires. En Europe, la consommation de matières s'élève à près de 100 tonnes par habitant et par an et est en augmentation constante ; il n'y a que de faibles signes de diminution aujourd'hui. Les forts intrants des processus de consommation sont contrebalancés par les sortants, essentiellement les déchets et les émissions. Alors que du côté alimentation du système, les limites ne sont pas encore visibles, elles apparaissent du côté aval (CO₂ et changement climatique, CFC et couche d'ozone stratosphérique, gestion de l'azote et de la qualité des nappes phréatiques, etc.). Certains matériaux présentent des temps de résidence courts (emballages, déchets de la presse, aliments) et se transforment rapidement en déchets. Mais davantage de matériaux présentent, dans leurs utilisations, des temps de résidence plus longs (bâtiments, réseaux, produits électroménagers). En raison de l'augmentation actuelle des flux et stocks de matières, les quantités de déchets augmenteront dans le futur et les compositions changeront également. La gestion des déchets reste donc une tâche importante. Elle doit être intégrée dans la gestion matière, celle des ressources, et celle de l'environnement.

En Europe, la mission historique de la gestion des déchets pour assurer des conditions d'hygiène acceptables dans les

zones urbaines est aujourd'hui remplie. Dans la seconde moitié du XX^e siècle, de nouveaux objectifs sont devenus importants : aujourd'hui, la gestion des déchets répond à trois objectifs.

- Garantir que les « sous-produits » du système anthropique sont dirigés vers les « stockages ultimes » comme les centres d'enfouissement technique (CET), des sols et des sédiments qui ne présentent aucun risque environnemental à long terme. Les « stockages ultimes » sont d'une importance considérable car la stratégie de dilution, qui est acceptable pour certaines substances, ne peut en aucun cas s'appliquer à tous les matériaux. Des substances potentiellement dangereuses comme les hydrocarbures halogénés (CFC) ou les métaux lourds ne peuvent pas être dispersés sans limites ; ils doivent être transformés et stockés dans des « stockages ultimes » sûrs.

- Recycler les déchets potentiellement réutilisables dans le cycle de production-consommation. Les produits du recyclage doivent répondre aux exigences des normes techniques et environnementales, et trouver un marché existant ou envisageable.

- Informer le secteur production afin que les concepteurs prennent en compte les objectifs de gestion des déchets lorsqu'ils créent de nouveaux procédés, biens ou systèmes.

Aujourd'hui, les objectifs suivants de gestion des déchets sont inclus dans la législation de la plupart des pays européens :

- protection de l'homme et de l'environnement,
- préservation des ressources (énergie, matière, terrains),
- et gestion des déchets sans interventions ultérieure.

La gestion des déchets sans intervention ultérieure peut être définie de la manière suivante. En premier lieu, il faut des CET qui ne nécessitent pas de traitement à long terme. Les procédés de traitement des déchets doivent donc produire des résidus inertes par séparation et fixation des polluants. En second lieu, le recyclage doit être conçu pour

1 TU Wien, Institut für Wassergüte und Abfallwirtschaft.

2 Bauhaus-Universität Weimar, Lehrstuhl für Verfahren und Umwelt.

3 TU Bergakademie, Freiberg, Institut für Energieverfahrentechnik und Chemie-Ingenieurwesen.

4 Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME).

5 Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Institut für Technische Chemie, Bereich Thermische Abfallbehandlung.

éviter d'une part la contamination de produits secondaires, et d'autre part que le problème des matières dangereuses soit transféré dans les futurs produits, dont auront à s'occuper les futures générations. Ces objectifs sont supposés être parfaitement réalisables si la gestion des déchets repose sur le principe de précaution. Pour atteindre ces objectifs, il faut prendre en considération les moyens suivants lors de la définition des systèmes de gestion des déchets : prévention, recyclage, et stockage sûr. Contrairement à l'opinion publique courante, cette liste ne représente pas des objectifs de gestion des déchets et ne prétend pas hiérarchiser les différentes actions. Les décisions sur la prévention, le recyclage et l'élimination doivent reposer sur des considérations économiques (conditions locales) et sur une analyse coût-avantage : quelle approche de gestion des déchets remplit les objectifs au coût le plus faible ?

L'attitude du public, sa compréhension et son acceptation des questions et décisions liées à la gestion des déchets constituent des « prérequis » essentiels pour le succès dans ce domaine. Les aspects scientifiques, techniques,

économiques et environnementaux de la gestion des déchets doivent être le plus transparents possible, et les prises de position traditionnelles (ex. emballage « bouc émissaire », « plus le taux de recyclage est élevé, meilleur c'est ») sont remises en question au vu de leur historique technologique et économique.

2. De l'importance de la gestion des déchets pour la préservation des ressources et la protection environnementale

La quantité de déchets solides (5-10 tonnes/habitant.an) est faible comparée à la consommation totale annuelle (> 100 tonnes) et à la quantité d'eau usée (environ 60 t/h.an). La plus grande fraction, qui comprend les déchets d'excavation et de construction, résulte des activités de construction (figure 1). Environ un quart de tous les déchets sont des matériaux combustibles. Les déchets municipaux solides (DMS) ne représentent que 0,2 - 0,4 t/h.an, soit moins de 10 % de la masse totale de déchets et donc, d'un point de vue quantité, n'a que peu d'importance.

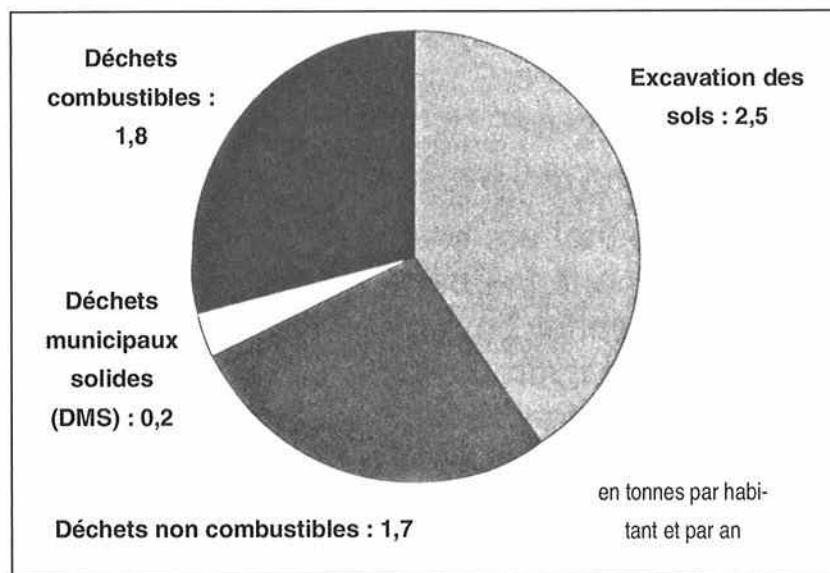


Figure 1. Production de déchets par habitant

D'un point de vue ressources ou environnement, la situation semble différente : les déchets peuvent contenir des substances valorisables et/ou toxiques. La figure 2 illustre le rapport entre le total des intrants et la matière dans les déchets combustibles (carbone, chlore, quatre métaux lourds) ainsi que l'énergie. Elle montre que les déchets combustibles présentent de fortes teneurs en métaux

lourds atmosphériques comme le cadmium et le mercure. Près de la moitié de ces métaux potentiellement dangereux sont en fait contenus dans le flux de déchets combustibles. D'autre part, la contribution des déchets combustibles à la production nationale d'énergie, de carbone, de chlore et de plomb est faible (inférieure à 10 %).

Cela montre clairement où se situent les priorités dans la gestion des déchets. Tout d'abord, il faut identifier les produits et substances pertinents au vu des objectifs de gestion des déchets. Ensuite, la conception des procédés et systèmes de gestion des déchets doit prendre en compte la collecte, le recyclage et le stockage sécurisé de ces substances prioritaires. Sur la base des connaissances actuelles, les métaux lourds constituent des substances

toxiques. La collecte et le traitement des déchets doivent être adaptés à ces substances prioritaires et ces dernières doivent être dirigées vers les produits de recyclage appropriés et les stockages ultimes. Il faut noter que de nombreux éléments peuvent être à la fois des ressources et des substances dangereuses, en fonction de leur concentration, de la spéciation chimique de l'élément et du lieu d'impact.

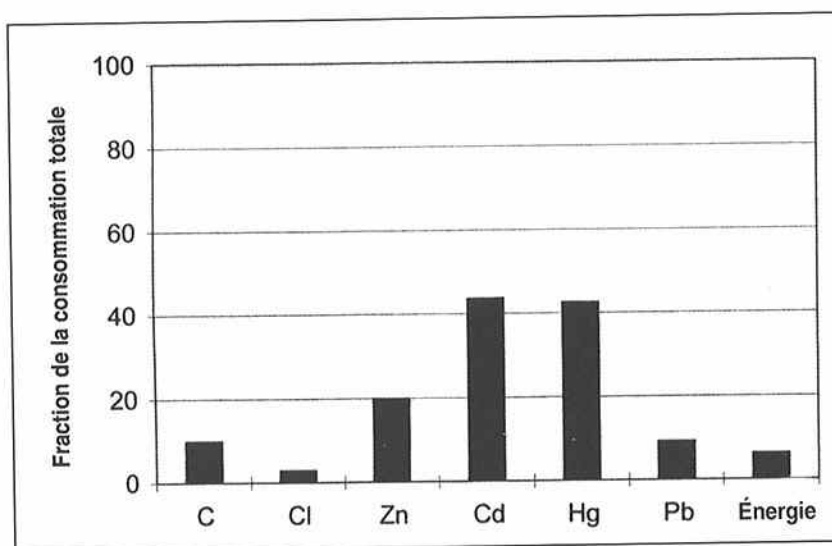


Figure 2. Les déchets combustibles contiennent plus de 40 % du mercure et du cadmium total importés et représentent donc des vecteurs importants de ces métaux lourds

Il est probable que l'aspect ressource des déchets prendra de plus en plus d'importance. Sachant que, d'après la figure 2, de fortes teneurs en mercure et en cadmium se trouvent dans les déchets combustibles, leur traitement devrait en principe conduire à de nouveaux plans de recyclage pour ces métaux et pour d'autres substances. La séparation est utile pour les deux stratégies : le recyclage et le stockage sécurisé. Toutefois, la séparation ne peut se concentrer que sur la séparation mécanique. Une large fraction des métaux lourds se trouve dans les déchets sous différentes formes (additifs ou pigments dans les plastiques) et nombre d'entre eux, particulièrement le mercure et le cadmium déjà mentionnés, forment des composés volatils à haute température. En conséquence, le traitement thermique doit également être utilisé, puisqu'il s'agit d'un procédé bien adapté à une séparation simple et effective de tels métaux et de leurs concentrations, uniformément distribués dans de petits flux massiques.

En général, il est important de déterminer si la gestion des

déchets constitue la méthode la plus appropriée pour atteindre efficacement les objectifs de préservation des ressources et de protection environnementale. De plus, d'un point de vue rationnel, les matériaux qui présentent des propriétés chimiques uniformes doivent être collectés et traités collectivement. Ainsi, certains systèmes actuels de gestion des déchets qui se concentrent sur la fonction d'un matériau (comme l'emballage), devraient être ré-évalués. Les résultats de telles évaluations devraient ensuite être comparés aux systèmes de gestion qui se concentrent sur la collecte et le traitement du matériau lui-même (ex. plastiques, cf. figure 3, papier ou aluminium). Sachant qu'aujourd'hui les systèmes de gestion basés sur la fonction permettent de collecter environ 10 % du flux total de matière, il semble intéressant d'étudier comment collecter et utiliser efficacement les 90 % restants. La gestion des déchets pourrait être beaucoup plus efficace si l'accent était mis sur les flux totaux de matière, plutôt que sur les flux de déchets provenant de secteurs économiques individuels.

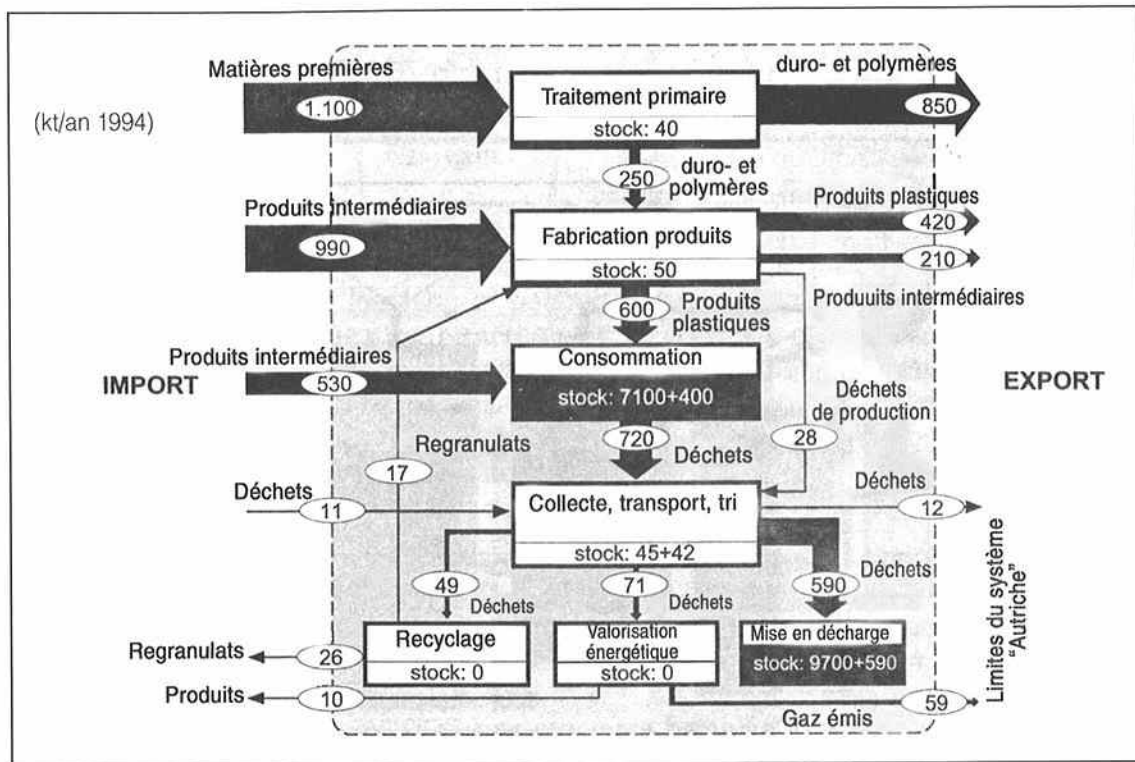


Figure 3. Flux et stocks de plastiques en Autriche (le décret sur les emballages contrôle environ 5 à 10% des plastiques totaux consommés)

Sachant que la gestion des déchets provenant de certains produits ou substances est cruciale pour la protection de l'environnement et la préservation des ressources, il est essentiel de disposer de suffisamment de connaissances sur les procédés de traitement des déchets et sur leur potentiel pour contrôler les flux matières. Aujourd'hui, les informations disponibles sur les procédés de traitement ne sont pas uniformes. Alors que les données sur les procédés thermiques sont abondantes et détaillées, la connaissance sur d'autres traitements (procédés mécaniques, biologiques ou de recyclage) demeure généralement rudimentaire. Pour parvenir à une prise de décision rationnelle dans la gestion des déchets, le niveau d'information doit être plus ou moins égal pour tous les systèmes évalués. Les informations suivantes sont indispensables pour les décisions liées au choix des procédés de traitement des déchets : bilan matière y compris les coefficients de transfert des substances les plus importantes ; bilan énergétique ; inventaire des émissions (concentrations et flux) ; composition et qualité des produits et résidus en termes d'exigences techniques et environnementales ; identification des stockages ultimes à long terme pour les résidus et les émissions par rapport à la fiabilité du procédé ; coûts y compris l'évacuation des résidus et les émissions à long terme des CET.

En résumé, l'objectif de la gestion des déchets dans le cadre d'une gestion durable des matières est de produire des matériaux recyclés pour les marchés anciens et nouveaux, de diriger les matériaux, sous forme d'émissions ou de résidus, vers les stockages ultimes appropriés disposant des capacités adéquates. Cet objectif doit être atteint de manière transparente et économiquement viable, acceptable par le public. Quelles sont les travaux de recherche nécessaires pour cela ?

3. Besoins en recherche

3.1. Traitement thermique des déchets

Comme nous l'avons indiqué précédemment, l'incinération des déchets est aujourd'hui bien maîtrisée en termes de flux matières, d'impact environnemental, de qualité des produits. De plus, elle se caractérise par de hautes performances techniques. Les principaux objectifs du procédé consistent à rendre les déchets inertes, à récupérer de l'énergie, et à concentrer les polluants dans de petits flux de résidus. Une usine moderne d'incinération des déchets comprend un four, une chaudière pour la récupération de l'énergie, et un système de contrôle de la pollution atmosphérique.

Le procédé de combustion assure la transformation presque totale de la matière organique en CO₂ par oxydation, et assure la destruction thermique des organismes infectieux et des polluants organiques présents dans les déchets. Pour les substances inorganiques, il agit comme procédé de transformation et de séparation, en fonction

des caractéristiques du matériau concerné et des conditions locales chimiques et physico-chimiques du lit de combustibles. La récupération énergétique peut atteindre jusqu'à 70 % dans le cas d'une utilisation combinée chaleur-électricité.

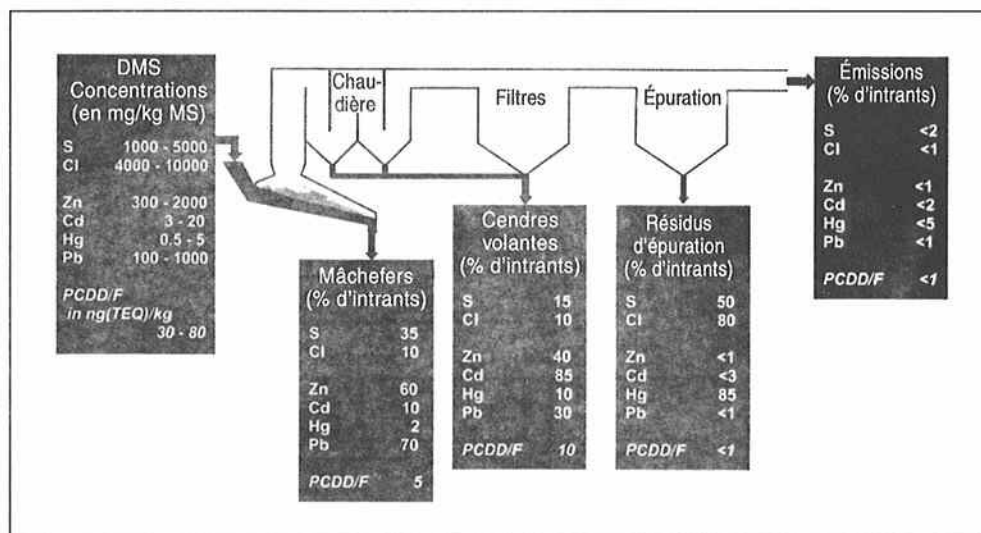


Figure 4. Plages de concentration des éléments sélectionnés et PCDD/F dans les déchets municipaux solides (DMS), inventaire des résidus d'incinération des DMS calculés en pourcentage des intrants

La figure 4 illustre la plage de concentrations types des éléments sélectionnés dans les déchets municipaux solides et leurs répartition dans un incinérateur à grille [IAWG 1997]. Des éléments non métalliques (halogènes, azote, soufre, etc.) ainsi que des métaux lourds (mercure, zinc, cadmium, plomb, etc.) sont transférés préférentiellement dans la phase gazeuse. Les composés de métaux volatilisés, à l'exception de ceux du mercure qui doivent être traités pendant la phase d'épuration (ou lavage), se condensent dans la partie chaudière sur les surface des cendres volantes et sortent de l'incinérateur avec les cendres de la chaudière et du filtre. Les métaux lithophiles (titane, manganèse, fer, nickel, etc.) sont principalement transformés en composés d'oxydes et sont piégés dans la matrice de silicates/oxydes des mâchefers.

La figure 4 contient également les chiffres de dioxines/furannes (PCDD/F). Les PCDD/F dans le combustible sont, comme d'autres espèces organiques, presque totalement détruits par la combustion et ceux que l'on trouve dans les résidus sont reformés par synthèse de novo. Grâce aux étages très performants de traitement des gaz mis en œuvre dans les incinérateurs modernes, les rejets à l'atmosphère de tous les polluants et éléments organiques sont extrêmement faibles, et répondent aux exigences de l'ensemble des législations européennes. Toutefois, les

« écologistes » se posent toujours la question de savoir si ces faibles niveaux d'émission garantissent la conformité avec le premier objectif de gestion des déchets, c'est-à-dire la protection de l'homme et de l'environnement. Les limites de pollution atmosphérique sont en principe établies sur la base d'une évaluation éco-toxicologique des émissions qui en résultent. Les valeurs limites actuelles sont toujours des compromis entre la connaissance des effets, la technologie disponible, et les intérêts politiques. L'éco-efficience n'est pas encore prise en compte comme paramètre.

Afin d'avoir une idée des effets environnementaux actuels des émissions atmosphériques provenant d'un incinérateur moderne de déchets, nous avons étudié l'impact des polluants sélectionnés sur la qualité de l'air ambiant, et ce sur la base du modèle de dispersion utilisé par le « South Californian Regulatory Board » [SCAQMD 1991] (Conseil de régulation de Californie du Sud). Les résultats présentés dans le tableau 1 indiquent que le plus grand apport provient du mercure (environ 8 %), et que la contribution de tous les polluants émis se situera bien en dessous de la plage de qualité de l'air ambiant. On peut donc en conclure que l'air constitue un « puits » intermédiaire immédiat pour les rejets émis par les incinérateurs de déchets les plus modernes.

	Rejet à la cheminée	Atmosphère	Contribution de la cheminée à la pollution de fond de l'atmosphère en %
HCl	5 mg/m ³	30 µg/m ³	0,5
SO ₂	20 mg/m ³	20 µg/m ³	3
Cd	5 µg/m ³	3 ng/m ³	5
Hg	20 µg/m ³	5 ng/m ³	8
PCDD/F (TEQ)	0,05 ng/m ³	50 fg/m ³	3

Tableau I. Pertinence environnementale des émissions de certains composants

Le mâchefer est une matrice de silicates dont les teneurs en métaux sont largement supérieures à celles que l'on trouve dans la lithosphère. Cette caractéristique devrait, à première vue, disqualifier ce matériau pour l'enfouissement. Compte tenu de l'impact environnemental, la mobilisation ou la lixiviation de constituants potentiellement toxiques est inquiétante. Dans la plupart des pays, la mise en décharge ou l'utilisation de ce matériau sont régies par la réglementation. Les mâchefers des incinérateurs modernes, après prétraitement mécanique et vieillissement, répondent sans difficulté aux exigences des normes de lixiviation établies pour les CET et pour son recyclage comme matériau de construction routière. Le mâchefer, grâce à sa forte capacité tampon pour les carbonates, garantit une libération lente des métaux lourds pendant des milliers d'années, qui peut être modélisée afin de prédire

son comportement dans un CET spécifique ou dans un scénario d'utilisation donnée [IAWG 1997].

Afin de mettre en perspective les effets environnementaux des mâchefers, d'autres matériaux de construction (gravier du Rhin, et matériau issu de recyclage routier) ont été soumis au test de lixiviation réglementaire allemand DEV S4. Les résultats pour les métaux sélectionnés sont présentés figure 5. Les résultats ne montrent pas de différence significative entre le mâchefer et les autres matériaux de construction [SAUTER 2000]. Nous pouvons en conclure que des remblais peuvent constituer une méthode d'enfouissement ultime pour les mâchefers, que d'autres utilisations sont possibles, et que ces méthodes permettent de préserver des ressources, bien que le flux massique disponible soit faible par rapport au flux total dans ce secteur.

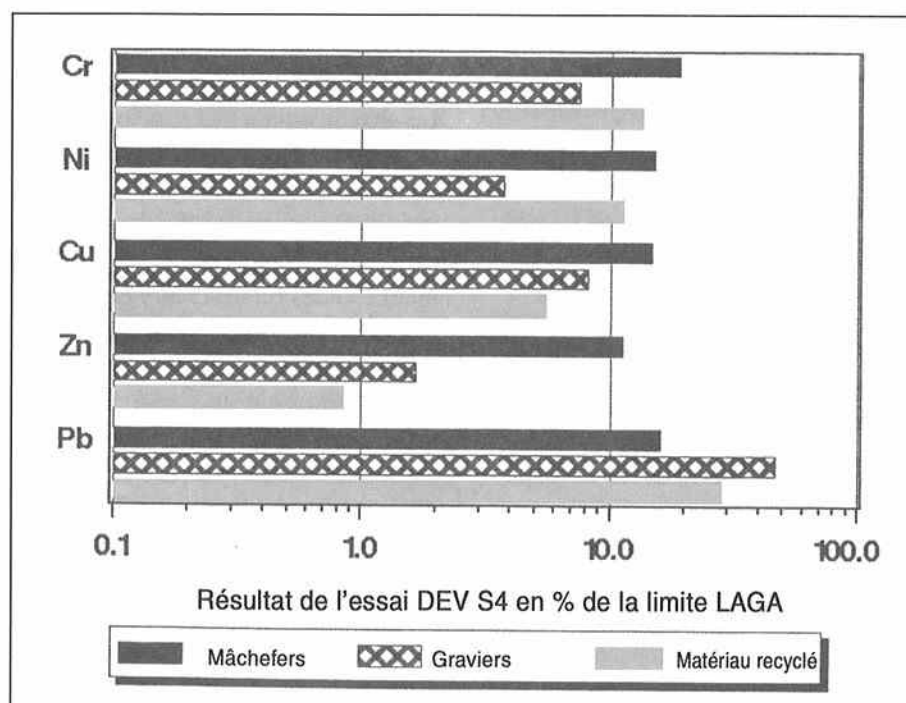


Figure 5. Résultats de l'essai allemand de lixiviation DEV S4 pour les matériaux sélectionnés (mâchefer de four à grille, gravier, matériaux recyclés) en pourcentage des normes allemandes LAGA pour la construction routière

Les cendres de chaudières et de filtres, caractérisées par de fortes concentrations de métaux lourds et de polluants organiques, sont classés comme déchets dangereux, et doivent être soit rendus inertes, soit enfouis dans des sites spéciaux et sûrs, de préférence souterrains. Plusieurs procédés ont été développés pour l'immobilisation, la séparation et la récupération partielle de métaux comme le cadmium, le zinc ou le plomb. En Europe, il n'existe pas de marché pour de tels procédés ou pour la récupération des métaux. Il est cependant envisageable de stocker ces matériaux, par exemple en introduisant une taxe à la source, qui permettrait d'attendre des conditions économiques plus favorables.

Si des matières particulières sont efficacement éliminées en aval de la chaudière, le mercure est le seul métal lourd transféré en quantité notable dans le système d'épuration chimique des fumées. Ce métal doit être séparé des résidus d'épuration, éventuellement à des fins de récupération, mais surtout pour des raisons environnementales. Des procédés adaptés ont été développés. Certains résidus sont principalement composés de sels alcalins ou de sels alcalino-terreux. Lorsqu'il existe un réseau d'assainissement de grande capacité, ces sels peuvent être rejetés, après épuration et ajustement du pH, et finir dans le centre d'enfouissement ultime le plus approprié pour de tels matériaux, à savoir la mer. Sinon, les sels doivent être stockés sur des sites exempts de tout impact hydrologique, de nouveau de préférence dans des CET souterrains.

Des tentatives ont été menées en vue de récupérer le HCl et le gypse, en plus du mercure, dans les effluents du traitement humide des gaz. Dans la plupart des cas, ces mesures se sont révélées économiquement peu viables. Aujourd'hui, seuls quelques centres d'incinération allemands récupèrent ces composés.

Il ressort de ce court article que l'incinération des déchets répond aujourd'hui aux objectifs de traitement des déchets, avec les meilleures performances techniques et une bonne compatibilité environnementale. Des recherches sont encore nécessaires, essentiellement en vue de simplifier les procédés et de réduire ses coûts. La maintenance constitue, à ce titre, un facteur crucial (corrosion des tubes des chaudières, des grilles de combustion, et du revêtement réfractaire des fours). Le développement de petits centres de traitement des déchets à des coûts concurrentiels doit faire l'objet de futures recherches. Le développement de centres simples et peu onéreux, devrait permettre de construire des incinérateurs de déchets dans les pays en voie de développement, où il existe une forte demande

pour la protection contre la pollution des ressources hydriques par les décharges.

De ces résultats il découle que les mâchefers ne nécessitent pas d'autre traitement thermique destinés à améliorer leur stabilité de lixiviation. La fusion ou la vitrification ne sont acceptables que dans le cadre d'un procédé thermique primaire, ou si elles permettent d'obtenir une meilleure qualité ouvrant des opportunités commerciales. Si tel n'est pas le cas, la consommation d'énergie du procédé de fusion ne permet pas d'atteindre l'éco-efficacité.

Bien que la libération de métaux à partir du mâchefer puisse être modélisée sur plusieurs siècles, ce qui permet de prédire leur devenir dans un scénario d'utilisation, le comportement à long terme de la matrice du mâchefer sur un site d'enfouissement est encore mal connu.

D'autres procédés thermiques, comme la pyrolyse ou la gazéification, qui semblent prometteurs en termes de taille et de flux de déchets spéciaux, présentent des performances techniques moins avancées. Après plus de 30 ans de développement, ils doivent encore être améliorés pour atteindre l'état de l'art de l'incinération des déchets.

3.2. Procédés de traitement mécano-biologiques (PTMB)

Au début des années 90, l'objectif des PTMB, à savoir la production d'une « fraction utilisable » (compost), a été remplacé par les objectifs actuels, c'est-à-dire « la valorisation d'un matériau récupéré », la production d'une « fraction propre à l'enfouissement », et la production de « combustibles solides récupérés (CSR) ».

Les objectifs actuels sont en accord avec ceux mentionnés en introduction pour la gestion des déchets. Il est toutefois difficile de déterminer dans quelle mesure ils ont été atteints par les divers PTMB, et quel est leur potentiel théorique. Les difficultés pour de telles évaluations, contrairement à celles relatives aux procédés de traitement thermique indiqués ci-dessus, sont attribuées, d'une part, au peu de données disponibles concernant les flux de matières et d'énergie et d'autre part, au manque d'expérience sur le comportement à long terme des fractions dites biologiquement inertes pour les enfouissements.

Afin de définir les besoins pour de futurs travaux de recherche et de développement, les objectifs des PTMB mentionnés précédemment doivent être discutés en relation avec les objectifs communs de gestion des déchets. Le *tableau II* donne un aperçu général avec des exemples.

Chaque situation doit bien entendu, être prise en compte, à savoir le respect des structures existantes de gestion des déchets, la disponibilité des ressources, etc. Dans ce cadre, certains des points n'ont que valeur d'exemple.

Chaîne globale du procédé		Besoins en recherche	
PTMB	Traitements en aval	Traitements divers	Chaîne globale du traitement
Récupération de matériau valorisable	Utilisation dans l'industrie primaire (acier, ciment)	Degré de séparation Qualité des produits	Flux matières (rejets diffus)
Production de fractions aptes à l'enfouissement	Enfouissement	Comportement à long terme ; stockage final	Bilans matière et énergie
Production de "combustibles solides récupérés" (CSR)	Production d'énergie (centrale thermique, industrie primaire)	Critères pour les CSR : Assurance qualité, Comportement à la combustion (inflammation, imbrûlés, transfert thermique, corrosion) Distribution des polluants (Hg)	Niveau de préparation requis et/ou complexité
Fraction résiduelle	Traitement thermique des déchets (IDMS)	Comportement en combustion (voir ci-dessus)	Coûts

Tableau II. Aperçu des besoins en recherche dans le domaine des PTMB (exemples entre parenthèses)

L'étendue du traitement (préparation), et donc la complexité des procédés, est un point important dans le traitement mécano-biologique par rapport aux chaînes globales de procédés⁶. Sa qualité influence fortement les exigences spécifiques pour la valorisation en aval des fractions produites. De plus, un traitement de plus en plus poussé consomme plus d'énergie, nécessite plus de matière, peut induire des problèmes de pollution et enfin, augmente les coûts. En conséquence, l'étendue du traitement doit d'abord être ajustée au profil de qualité des fractions produites de manière à permettre l'utilisation d'un stockage final ou de répondre à des exigences équivalentes. Les points traités ici n'ont que valeur d'exemple. Les auteurs renvoient le lecteur à des rapports spécifiques pour des informations plus détaillées sur les différents PTMB [SOYEZ 2001].

Sur la base de l'objectif de « récupération de matériaux valorisables », les métaux (ferreux et non ferreux), les déchets de bois, de verre et de minéraux, constituent autant de fractions qui pourraient être séparées, avec plus ou moins de facilité, par les PTMB. Il est possible d'obtenir des fractions quantitativement et qualitativement différentes en fonctions des méthodes utilisées. À première vue, une telle récupération et un tel recyclage dans le cycle de production, répondent aux objectifs de préservation des ressources. Toutefois, il faut globalement savoir si la récupération des diverses fractions est ou non utile. D'autres activités devraient se concentrer sur le développement de procédés de préparation bon marché et peu

consommateurs d'énergie, qui augmentent la précision de la séparation et améliorent donc la qualité du produit.

La production d'une fraction « apte à l'enfouissement » fait l'objet de plusieurs projets de recherche. Pour le moment, la fraction résiduelle du PTMB ne peut pas répondre aux mêmes critères d'enfouissement (perte au feu, paramètre de lixiviation, particulièrement le COT), que ceux des mâchefers produits par l'incinération des déchets. Toutefois, les études sur le comportement en CET des résidus de PTMB montrent une faible production de gaz, une faible lixiviation, et un faible affaissement résultant des transformations biologiques. Cela nous amène à penser que ces matériaux, une fois enfouis, peuvent avoir un comportement satisfaisant en termes de « respiration », de production de gaz et de COT dans les lixiviats. La question cruciale concerne le comportement à long terme des résidus de PTMB dans les CET, c'est-à-dire : faut-il effectuer des recherches pour déterminer si la qualité atteinte répond aux exigences d'un stockage définitif, particulièrement en regard du comportement à long terme ? Si tel est le cas, il serait justifié d'abandonner le traitement thermique, aujourd'hui obligatoire, des fractions organiques des déchets avant mise en décharge, et d'accepter le PTMB comme procédé destiné à rendre les matériaux inertes.

Des incertitudes considérables demeurent au regard des exigences de qualité pour les combustibles solides de récupération (CSR) et de la garantie d'une telle qualité. Ces CSR peuvent être utilisés dans les fours à ciment, les centrales thermiques, et ce qu'on appelle les centres de valorisation thermique. D'un point de vue ingénierie de procédé, ces derniers sont semblables à des incinérateurs de déchets ménagers solides (DMS). Si l'on souhaite utiliser les CSR, deux stratégies fondamentales sont envisageables.

⁶ La prise en compte des chaînes de procédés, c'est-à-dire l'inclusion d'autres procédés pour l'utilisation des matériaux et de l'énergie dans le bilan total, est une demande inévitable pour l'évaluation des PTMB.

En premier lieu, il faut essayer d'ajuster les propriétés CSR à celles des combustibles conventionnels. En second lieu, il faut envisager d'adapter le procédé thermique aux propriétés des CSR. Ces deux stratégies présentent de remarquables potentiels qui doivent être explorés.

Les procédés à haute température, comme la calcination du ciment, nécessitent des combustibles de substitution à haut pouvoir calorifique, pour obtenir un faible rapport d'échange thermique. De hauts pouvoirs calorifiques correspondants obtenus avec les CSR, sous-produits des DMS, ne seront possibles qu'avec des fractions comme les plastiques, le bois et le papier. Comparés au charbon, ces CSR présentent des propriétés d'incinération et de combustion totale différentes en raison de la teneur beaucoup plus élevée en matières volatiles. Cette situation conduit à des conditions différentes de dégagement et de transfert thermique, qui jouent un rôle important pour la qualité du produit dans les cimenteries, ainsi que pour le comportement du procédé dans les centrales thermiques. En plus des conditions de transfert thermique, une attention particulière doit être apportée aux problèmes de corrosion, particulièrement dans les centrales.

L'inventaire des substances toxiques dans les CSR, calculé comme concentration par unité énergétique [mg/MJ], est en général plus élevé que celui des combustibles conventionnels. De plus, les centrales thermiques et les procédés à haute température, utilisés pour les traitements thermiques, sont généralement moins équipés d'installations d'épuration des gaz que les incinérateurs de DMS. En conséquence, une attention spéciale doit être portée à la dispersion ou à la dilution des polluants, en tout premier lieu le mercure (voir chapitre 3.1). L'inclusion de polluants dans des produits comme le ciment doit être vue plus comme un principe de dilution, et elle est bien différente par ses concentrations des petits flux de résidus, comme cela est recherché dans l'incinération des DMS.

En conséquence, si l'on considère la production de CSR, le développement continu des PTMB doit être fortement lié à d'autres études, compte tenu de la conception et du mode d'exploitation du procédé thermique destinataire (propriétés de la technologie du combustible, corrosion et comportement des scories, etc.), ainsi que du contrôle qualité des résidus et des produits.

Lorsque l'on examine les PTMB à la lumière des objectifs de gestion des déchets discutés plus haut, il reste urgent d'obtenir des informations fondées et reproductibles sur les flux matières et énergie dans l'ensemble de la chaîne (y compris l'utilisation subséquente et les procédés de traitement). Alors que les bilans matières et énergies pour les

principaux composants sont disponibles dans des cas spéciaux [IBA 1998], de fortes incertitudes persistent concernant le devenir des polluants. Les matériaux produits par les PTMB doivent répondre aux exigences d'utilisation des procédés aval.

4. Conclusions

Si l'on considère les objectifs de la gestion des déchets (protection de l'homme et de l'environnement, conservation des ressources, gestion des déchets sans besoin d'interventions futures), il apparaît que dans une certaine mesure, la législation actuelle sur les déchets et un certain nombre de systèmes de gestion des déchets utilisés sont, pour le moment, en conformité avec ces objectifs. De grandes avancées ont été faites au cours des dernières décennies en vue de la mise en œuvre de systèmes de gestion intégrée des déchets. L'industrialisation en augmentation rapide, qui s'accompagne d'une spectaculaire urbanisation dans certaines parties du monde, ainsi que la croissance continue de la consommation de matière, rendent difficile le développement de systèmes de gestion des déchets qui répondent aux objectifs déjà mentionnés par le biais d'une technologie simple et bon marché. On constate également une forte demande pour des procédés de traitement de faibles quantités de déchets à des coûts raisonnables.

En ce qui concerne les principaux procédés de traitement des déchets, les études les plus poussées portent de toute évidence sur l'incinération des déchets. Lorsque l'on connaît la technologie installée et la composition des intrants, il est possible d'effectuer des estimations fiables de rejets atmosphériques et d'effluents liquides, et de qualité des résidus. On peut établir les bilans massiques pour la plupart des éléments et déterminer le devenir des polluants organiques transportés par l'eau. Des travaux de recherche pourraient être dirigés en vue de simplifier la chaîne de procédé afin de réduire les efforts, et rechercher la viabilité économique de l'incinération des déchets. On peut modéliser le comportement à moyen et long termes des métaux lourds dans les mâchefers. D'autres recherches sont nécessaires en ce qui concerne la corrosion et éventuellement la transformation de phase de la matrice silicates-oxydes qui, sur le très long terme, peut changer les propriétés de lixiviation.

Les informations sur les PTMB sont beaucoup plus fragmentées que celles disponibles sur l'incinération des déchets. Il y a un manque d'information sur les flux matière et les bilans des éléments, la transformation des polluants issus des déchets n'est pas détaillée, il est difficile de mesurer les rejets diffus, et l'on manque de données fiables sur le comportement à long terme des fractions de résidus. En

conséquence, les principaux aspects des futures études devront porter sur le devenir des polluants, sur la qualité des produits, sur le comportement à long terme des fractions destinées à l'enfouissement. L'évaluation des concepts, au moyen des bilans massiques et énergétiques détaillés, fournissent des informations supplémentaires pour l'optimisation de l'ingénierie des procédés. Le développement de systèmes de gestion en vue d'augmenter le rendement global est également l'objectif des prochaines années.

En ce qui concerne plus particulièrement la production de CSR, il y a une forte demande de R&D à concernant les exigences portant sur leurs propriétés en tant que combustibles. Les CSR devraient remplacer les combustibles

conventionnels. En réponse à cette demande, il faut étudier la chaîne globale de procédé en prenant en compte l'ensemble des actions et la valorisation.

Afin de pouvoir comparer différents concepts, les aspects économiques doivent également être considérés. L'influence des structures existantes de gestion des déchets ne doit pas être négligée dans le processus d'évaluation ; ainsi la maintenance à long terme et l'entretien des CET devraient être mentionnés dans ces études. Enfin, il est important d'insister sur le fait que l'évaluation et le développement des PTMB doivent prendre en compte les conditions locales. Pour éviter les études poussées et onéreuses de cas spéciaux, il faut disposer de modèles fiables, de données saines, et de critères globalement acceptés.

Bibliographie

- FEHRINGER R., BRUNNER P.H. (1997) : « Flows of Plastics and their Possible Reuse in Austria, Proceedings « Paradigm to Practice of Sustainability », Wuppertal. Institute for Climate, Environment and Energy, Wuppertal Special, 4, 272.
- IBA GmbH, BZL GmbH, CUTEC GmbH (1998) : « Möglichkeiten der Kombination von mechanisch-biologischer und thermischer Behandlung von Restabfällen ». Umweltbundesamt Berlin, 1998. Report 1471114.
- International Ash Working Group (IAWG) Chandler A.J., Eighmy T.T., Hartlén J., Hjelm O., Kosson D.S., Sawell S.E., van der Sloot H.A., Vehlow J. (1997) : « Municipal Solid Waste Incinerator Residues ». Amsterdam, NL: Elsevier.
- MORT L.S. (2002) « Routinemäßiges Monitoring der Anthroposphäre anhand der Produkte der Entsorgung - Stand

der Entwicklung », *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 3-4, 53.

- SAUTER J. (2000) « Vergleichende Bewertung der Umweltverträglichkeit von natürlichen Mineralstoffen, Bauschutt-Recyclingmaterial und industriellen Nebenprodukten ». Diplomarbeit am Institut für Straßen- und Eisenbahnwesen der Universität Karlsruhe (TH).

- SOYEZ K. (2001) « Mechanisch-biologische Abfallbehandlung: Technologien, Ablagerungsverhalten und tung ». *Erich Schmidt Verlag GmbH & Co.*, Berlin 2001. ISBN 3503060006.

- South Coast Air Quality Management District (SCAQMD) (1991). « The SCAQMD Screening ». Report 1991.

Résumé

P.H. BRUNNER, M. BECKMANN, M. BORN, J.-M. MÉRILLOT, J. VEHLW. Besoins en recherche pour la gestion des déchets

L'augmentation des flux de matières induit une forte demande en gestion des déchets. L'élimination des résidus de nos activités doit être compatible avec la protection de l'homme et de l'environnement, la préservation des ressources et l'absence de traitements ultérieurs. Les stratégies et les procédés mis en œuvre sont différents au niveau des performances techniques et de la qualité environnementale, de sorte que leurs produits diffèrent en conséquence. Cet article décrit l'adéquation entre les procédés existants et les objectifs de gestion des déchets, et tente d'identifier les futurs besoins en recherche. Une évaluation rationnelle des divers procédés théoriques ou effectifs n'est possible que si :

- les flux de matières sont bien compris ;
- toutes les émissions sont quantifiées dans la transparence ;
- la qualité et la destination finale des résidus sont totalement décrits ;
- toutes les informations fiables sur les coûts totaux sont disponibles.

Summary

P.H. BRUNNER, M. BECKMANN, M. BORN, J.-M. MÉRILLOT, J. VEHLW. Research needs for waste management

Increasing material flows have as a consequence high demands on the managing of waste. The residuals of our activities have to be directed to final sinks in a way, which protects man and environment, saves resources and excludes any aftercare. The allocated strategies and processes are different in technical performance and environmental quality, and so are their products. The paper describes to what extent existing processes comply with the goals of waste management, and tries to identify future research needs. A rational evaluation of the various allocated or proposed processes requires a good understanding of the flow of materials, a transparent quantification of all emissions, a complete description of the quality and intended final sinks of all residues, and finally sound information about the total costs.