



DÉCIDER AVEC LES SCIENCES



LES DÉCHETS DES MENAGES

Dossier thématique

Les déchets des ménages

Introduction

Les instances internationales considèrent que la gestion des déchets est l'un des défis majeurs du XXI^e siècle. Les objectifs vont de l'amélioration des conditions de vie à la création d'une économie circulaire afin d'économiser le plus possible les ressources naturelles.

Le dossier traite de la gestion des déchets municipaux, qui est la grande priorité dans la plupart des pays. Les exemples sont pris principalement dans les trois grandes aires économiques actuelles : la Chine, les Etats-Unis et l'Europe (dans l'ordre alphabétique).

Le lecteur intéressé par les éléments du débat à l'échelle de la France est invité à consulter le dossier *Déchets* sur le site de l'IHEST (cf. la référence [16]).

([55] p. 7, [124])

Définitions

Déchet

La directive 2008/98/CE définit comme déchet *toute substance ou tout objet dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire*. Ceci ne veut pas dire qu'un déchet n'a aucune valeur car il peut intéresser une autre personne. C'est le cas par exemple des bouteilles vides qui sont des déchets pour les particuliers et de la matière première pour l'industrie du verre.

La définition des déchets municipaux varie d'un Etat membre à l'autre. En France, les déchets municipaux correspondent à tous les déchets dont la responsabilité de la collecte et de l'élimination est assurée par la commune. Ils comportent les déchets ménagers (ensemble des déchets produits par l'activité domestique des ménages : ordures ménagères, encombrants et déchets dangereux des ménages), les déchets du nettoyage municipal, les déchets de l'assainissement collectif et les déchets verts des collectivités. Les déchets du traitement de l'eau (ex : les boues des stations d'épuration) ne sont pas classés comme déchets municipaux.

Les déchets des ménages constituent l'essentiel des déchets municipaux, aussi les deux termes sont-ils considérés comme synonymes dans la plupart des textes.

([2], [7] p. 496, [14], [16] p. 5, [121] pp. 61-66)

DEEE

Déchets des équipements électriques et électroniques (WEEE en anglais). La Figure 1 donne l'importance relative des différents types d'objets composant les DEEE.

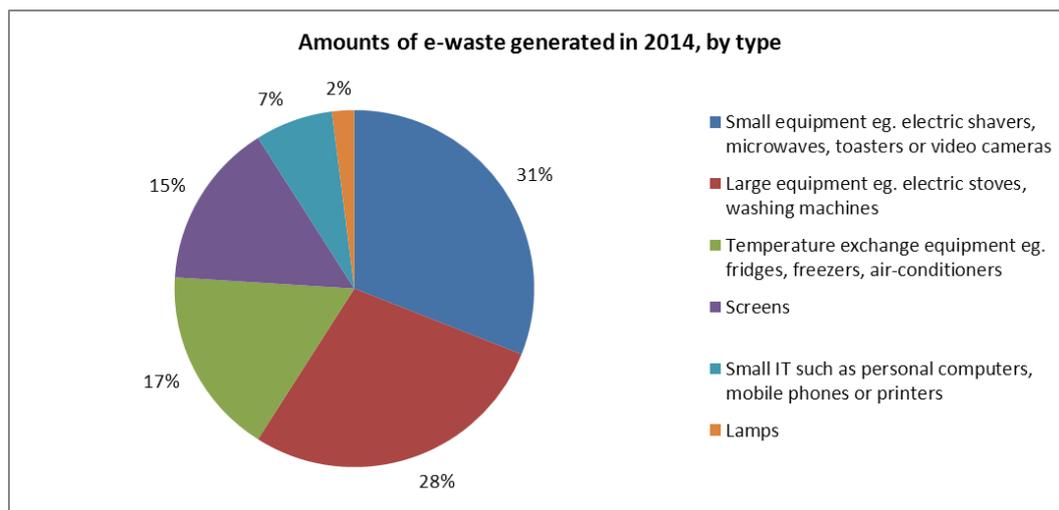


Figure 1. Proportions relatives des six grands types de DEEE en poids ([119] p. 96).

([119] p. 96)

Etats membres de l'Union européenne

AT	Austria	BE	Belgium	BG	Bulgaria	CY	Cyprus	CZ	Czech Republic
DE	Germany	DK	Denmark	EE	Estonia	EL	Greece	ES	Spain
FI	Finland	FR	France	HR	Croatia	HU	Hungary	IE	Ireland
IT	Italy	LT	Lithuania	LU	Luxemburg	LV	Latvia	MT	Malta
NL	Netherlands	PL	Poland	PT	Portugal	RO	Romania	SE	Sweden
SI	Slovenia	SK	Slovakia	UK	United Kingdom				

Tableau 1. Nom abrégé des Etats membres de l'Union européenne des 28 ([121] p. 47). Les Etats membres de l'Europe des 15 sont surlignés.

([121] p. 47)

Contenu

Introduction.....	1
Définitions	1
Déchet	1
DEEE.....	1
Etats membres de l'Union européenne	2
Contenu	3
Les politiques en matière de déchets.....	5
Les objectifs pour la gestion des déchets sont-ils les mêmes partout ?	5
Quelles ont été les grandes dates de la législation des déchets ?	6
Quels sont les prochains objectifs de l'Union européenne en matière de déchets ?.....	7
Le traitement des déchets participe-t-il à l'augmentation de l'effet de serre ?	8
Quel est le coût du traitement des déchets municipaux ?.....	9
La gestion des déchets municipaux représente-t-elle une dépense importante pour une ville ?.....	9
Pourquoi une bonne gestion des déchets est-elle difficile dans les pays en développement ?.....	10
Existe-t-il des aides internationales pour améliorer la gestion des déchets dans les pays en développement ?	10
La tarification incitative est-elle efficace en matière de traitement des déchets ?.....	11
Le mode de tarification influe-t-il sur la production de déchets ?	12
Peut-on réduire la quantité de déchets municipaux en agissant en amont des ménages ?	13
Les déchets aujourd'hui	14
Quelle est la part des déchets municipaux dans l'ensemble des déchets ?	14
Quelle est la quantité de déchets municipaux par habitant ?	15
Quelle est la composition des déchets municipaux ?	16
Que sait-on de la production de déchets dans le tiers-monde ?	17
Met-on encore souvent les déchets municipaux directement à la décharge ?	18
L'incinération des déchets municipaux est-elle une solution répandue ?.....	19
Le recyclage est-il la norme dans le monde ?	19
Les décharges	21
Qu'est-ce qui caractérise une décharge moderne ?	21
Une décharge moderne coûte-t-elle chère ?	22
Que deviennent les déchets enfouis dans une décharge ?.....	23
Quel est le cycle de vie d'une décharge moderne ?.....	24
Comment la période post-exploitation est-elle gérée ?	24

Peut-on raccourcir la période post-exploitation ?	25
Quelles sont les objections du public face à un projet de décharge ?	25
Que faire des anciennes décharges ?	26
Le <i>landfill mining</i> a-t-il un intérêt économique ?	26
Les biodéchets	27
Qu'est-ce qu'un biodéchet ?	27
Jette-t-on beaucoup de nourriture ?	27
Que disent l'Union européenne et la loi française au sujet des biodéchets ?	28
Quels déchets peuvent être convertis en énergie ?	29
Où en est-on dans le monde pour la valorisation énergétique des déchets ?	29
Quelles sont les techniques actuelles pour convertir les déchets en énergie ?	30
Que fait-on des déchets produits par la valorisation énergétique des déchets ?	31
Peut-on produire un compost de qualité avec les déchets municipaux ?	32
Le recyclage	34
Le tri des déchets – combien de poubelles ?	34
Le tri mécanisé des déchets recyclables fonctionne-t-il de façon satisfaisante ?	35
Comment fonctionne l'économie du recyclage en Chine ?	35
Combien rapporte le recyclage des déchets d'emballages ?	37
Qui finance la collecte et le recyclage des déchets ?	38
Quel rôle jouent les déchets municipaux dans la production de matières premières issues du recyclage ?	38
Pourquoi les DEEE sont-ils un cas à part ?	39
Quelle est la politique chinoise en matière de DEEE ?	39
Quelle est l'importance de la R&D dans l'industrie du recyclage ?	40
Quelle est l'importance du commerce international des déchets ?	42
Références	45

Les politiques en matière de déchets

Les objectifs pour la gestion des déchets sont-ils les mêmes partout ?

Il existe un consensus international pour que les objectifs en matière de gestion des déchets respectent l'ordre de priorité suivant (Figure 2) :

1. la prévention,
2. la préparation en vue du réemploi,
3. le recyclage,
4. une autre valorisation, notamment la valorisation énergétique,
5. l'élimination.

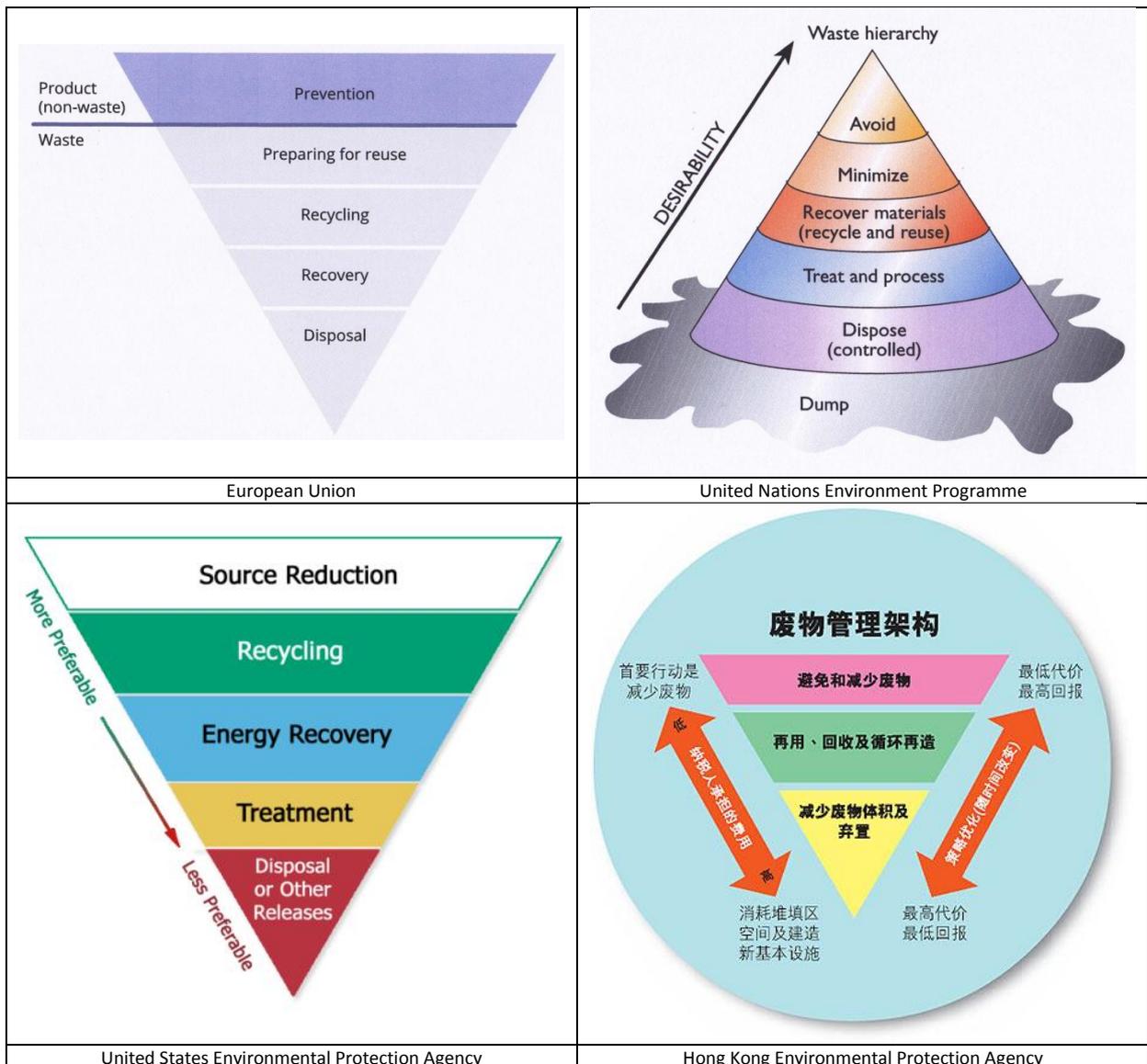


Figure 2. La hiérarchie des modes de gestion des déchets.

Les trois premières options sont généralement connues sous le nom des 3R (*Reduce, Reuse, Recycle*). Elles ont conduit à la notion d'économie circulaire.

La valorisation énergétique, l'option 4, fait principalement appel aux incinérateurs. L'option 5 revient à mettre les déchets directement à la décharge.

([5], [9] pp. 7-8, [14], [23] p. 105, [126] p. 9)

Quelles ont été les grandes dates de la législation des déchets ?

Les premières grandes lois sur la gestion et le traitement des déchets datent des années 1970 : 1970 au Japon, 1974 à Taiwan, 1975 dans l'Union européenne, 1976 aux Etats-Unis. Ces lois partaient du constat que les déchets sont une source de pollution et un gaspillage de matière première, ils présentent un risque pour la santé humaine et pour l'environnement.

En juin 2012, la *Conférence des Nations Unies sur le Développement* a adopté *L'avenir que nous voulons* comme principal document final. Le Paragraphe 218 porte sur la gestion des déchets. Il insiste sur la priorité qu'il faut donner à l'utilisation efficace des ressources et à la protection de la santé et de l'environnement. Il recommande de s'appuyer pour cela sur l'analyse du cycle de vie des produits. Il faut noter que plusieurs pays émergents avaient déjà une législation dans ce domaine, par exemple : la Corée du Sud en 1986, la Chine en 1993, Singapour en 1999, plusieurs lois après 2000 en Inde, l'Afrique du Sud en 2008, plusieurs lois à partir de 2010 au Brésil.

Le Tableau 2 montre l'évolution de la législation en Chine, aux Etats-Unis et en Europe. Les efforts portent surtout sur la gestion des déchets dangereux et le recyclage, priorités auxquelles est venue s'ajouter récemment la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Year	China	European Union	United States
1965			Waste Disposal Act
1970			Resource Recovery Act
1975		Waste Framework Directive 75/442/EEC	
1976			Resource Conservation and Recovery Act (RCRA)
1978		Hazardous Waste Directive 78/319/CEE	
1982	Provisional Environmental Protection Law. Certain Regulations on Environmental Protection and Improvement		
1983	Second National Meeting on Environmental Protection		
1984			Hazardous and Solid Wastes Amendments
1989		Basel Convention adoption	Agenda for Action
1990			RCRA Implementation Study
1993	Regulations Regarding Municipal Residential Solid Waste		Waste Minimization and Combustion Strategy for Hazardous Waste
1994		Packaging and Packaging Waste Directive 94/62/EC	
1996	Law on Prevention and Control of Environmental Pollution Caused by Solid Waste		Land Disposal Flexibility Act
1999		Landfill Directive 1999/31/EC	RCRA Cleanup Reforms I
2000	Technical Policies on the Disposal of Domestic Waste and the Prevention of Pollution		RCRA Cleanup Reforms II
2006	The National Eleventh Five-Year Plan on Urban Environment and Sanitization	Directive 2006/12/EC on waste	
2007	China's National Climate Change Programme Management Measures on Urban		

Year	China	European Union	United States
	Waste		
2008		Waste Framework Directive 2008/98/EC	
2009	Law on Circular Economy Promotion		
2012	National 12th five-year-plan on urban MSW harmless disposal facilities construction planning		

Tableau 2. Les grandes étapes de la législation sur les déchets en Chine, dans l’Union européenne et aux Etats-Unis ([9] p. 10, [19] p. 17, [45], [120], [123], [129], [137]).

([9] p. 10, [14], [15], [19] p. 17, [22] pp. 10-13, [45], [55] p. 12, [79], [98], [99] p. 6, [120], [123], [129], [137])

Quels sont les prochains objectifs de l’Union européenne en matière de déchets ?

Une révision de la législation en matière de déchets est en cours dans l’Union européenne. En décembre 2015 la Commission a proposé une directive qui remplacerait toutes celles qui couvrent ce sujet. Elle était en débat lorsque ce dossier a été rédigé.

Le projet de directive a pour objectif le développement d’une économie circulaire (Figure 3). Il est nécessaire pour cela d’augmenter l’efficacité des trois premières étapes de la hiérarchie des déchets (les 3R). La Commission propose de fixer les objectifs suivants pour 2030 :

- Diminuer de 50 % les déchets alimentaires.
- Recycler 65 % des déchets municipaux.
- Recycler 75 % des déchets d’emballage.
- Ne pas mettre à la décharge plus de 10 % des déchets municipaux.

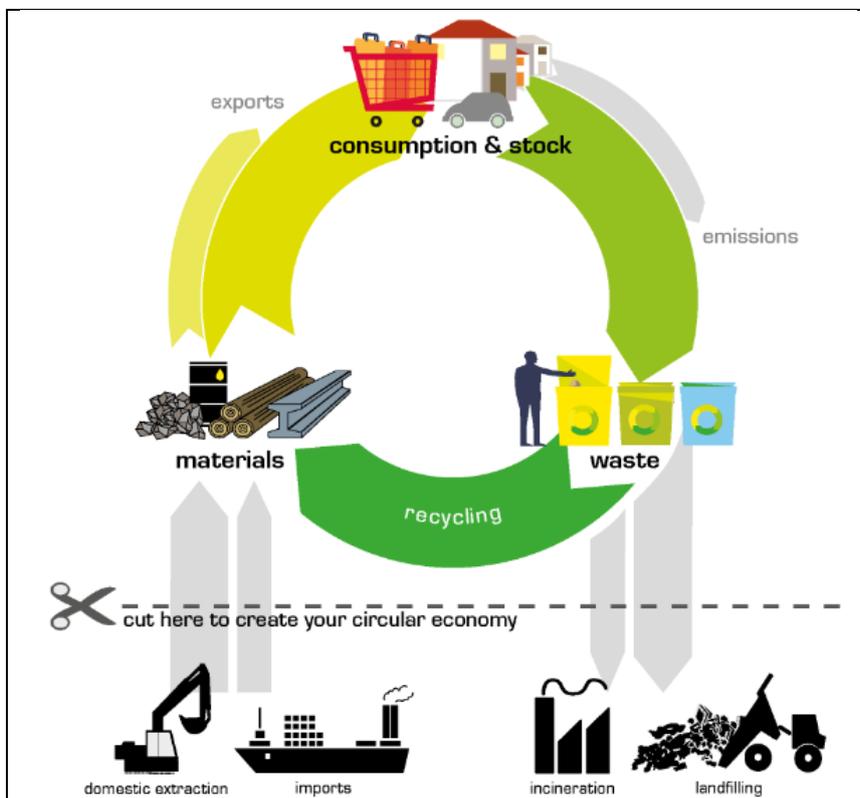


Figure 3. Présentation schématique de l’économie circulaire ([93] p. 172).

Cependant, l'élément clé pour atteindre une économie circulaire est la réorganisation du tissu industriel. Il faut d'une part généraliser « l'éco-conception », c'est-à-dire concevoir des produits minimisant la production de déchets et facilitant le recyclage. Il faut d'autre part créer des symbioses entre les usines géographiquement proches et entre les usines et les villes (Figure 4).

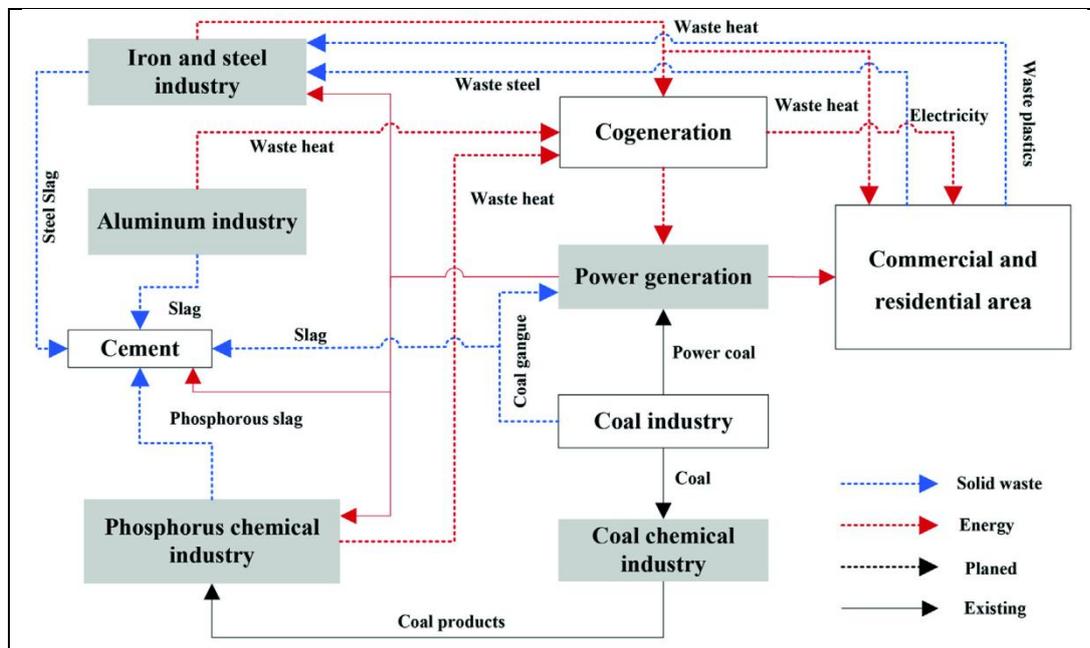


Figure 4. Schéma d'une symbiose industrielle et d'une symbiose entre zone urbaine et zone industrielle en Chine ([100]).

Les aspects industriels de l'économie circulaire ne sont pas traités dans ce dossier. Nous invitons le lecteur intéressé à consulter la référence [100].

([76], [93] p. 172, [133], [136], [125], [100])

Le traitement des déchets participe-t-il à l'augmentation de l'effet de serre ?

Le biogaz produit par la décomposition des déchets organiques est responsable de 5 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre. Ceci est dû au méthane présent dans le biogaz.

En revanche le gaz carbonique (CO_2) contenu dans le biogaz ou résultant de l'incinération des déchets n'augmente pas la concentration de gaz à effet de serre. En effet, il correspond à du gaz carbonique qui a été piégé récemment dans la matière organique grâce à la photosynthèse.

Seul le gaz carbonique produit par le traitement des déchets des produits chimiques de synthèse augmente la concentration de gaz à effet de serre car ils sont obtenus à partir de matière organique fossile (pétrole, gaz naturel, charbon). C'est le cas en particulier des plastiques. Ce gaz carbonique a été piégé par la photosynthèse il y a des millions d'années. Sa libération introduit un excès de CO_2 qui n'a pas encore trouvé sa place dans le cycle de la matière organique. C'est ce CO_2 qui contribue à l'augmentation de l'effet de serre (NB les émissions de CO_2 dues aux produits chimiques de synthèse sont marginales par rapport à la consommation d'énergies fossiles).

Le méthane et les oxydes d'azote (NO_x) sont des gaz à effet de serre plus puissants que le gaz carbonique. Une tonne de méthane a un effet équivalent à 23 tonnes de CO_2 ; une tonne d'oxydes d'azote a un effet équivalent à 296 tonnes de CO_2 (les oxydes d'azote sont produits lors de l'incinération des déchets).

([16] pp. 16-17, [55] p. 8)

Quel est le coût du traitement des déchets municipaux ?

Le Tableau 3 donne une estimation du coût du traitement de déchets municipaux en fonction du niveau de vie du pays.

	Low Income countries	Lower Mid Income countries	Upper Mid Income countries	High Income countries
Income (GNI/capita)	<US\$876	US\$876-3465	US\$3466-10725	>US\$10725
Waste generation (ton/capita/yr)	0.22	0.29	0.42	0.78
Collection efficiency (percentage collected)	43%	68%	85%	98%
cost of collection and disposal (US\$/t)				
Collection	20-50	30-75	40-90	85-250
Sanitary landfill	10-30	15-40	25-65	40-100
Open dumping	2-8	3-10	NA	NA
Composting	5-30	10-40	20-75	35-90
Waste-to-Energy	NA	40-100	60-150	70-200
Anaerobic Digestion	NA	20-80	50-100	65-150

Tableau 3. Tarifs du traitement des déchets municipaux pour différents niveaux de richesse nationale, chiffres 2013 ([54] p. 7b.9).

Les tarifs en Chine sont très inférieurs à ceux constatés dans les *Upper Mid Income countries* alors que la Chine fait clairement partie de ce groupe avec ses 6 800 dollars de PIB par habitant (chiffres 2013). Par exemple l'enfouissement dans une décharge moderne coûte 12 dollars la tonne en Chine et la conversion des déchets en électricité 40 dollars la tonne. Il s'agit dans les deux cas du bas de la fourchette des prix constatés dans le monde.

([54] p. 7b.9, [110] pp. 42-43)

La gestion des déchets municipaux représente-t-elle une dépense importante pour une ville ?

Une gestion moderne des déchets est coûteuse, elle représente de 3 à 15 % du budget d'une ville quel que soit le pays. Le coût est proportionnellement plus élevé dans les pays pauvres, ceci est vrai qu'on le compare au produit national brut ou aux revenus des ménages. Il faut noter que les sommes facturées aux ménages ne couvrent généralement pas les frais (Tableau 4).

Income level	City SWM budget per capita (US\$)	City SWM budget per capita as % of GNI per capita		SWM fee as % of household income	% of population that pays for collection	Reported cost recovery % by way of fees
		Range	Average			
High	75	0.03–0.40	0.17	0.44	99	81
Upper-middle	33	0.14–1.19	0.59	1.40	56	36
Lower-middle	10	0.40–1.22	0.69	0.26	28	27
Low	1.4	0.14–0.52	0.32	0.90	59	22

Tableau 4. Analyse financière de la gestion des déchets en fonction du coût et des revenus des habitants estimée sur un échantillon de 20 villes ([48], [75]). SWM : déchets municipaux. GNI : revenu national brut. Income level cf. Tableau 3.

Malgré tout, la population souhaite un peu partout bénéficier d'une gestion efficace des déchets municipaux. Selon les enquêtes sur l'acceptation de payer, elle serait prête à y consacrer de 1 à 2 % de ses revenus. Le chiffre peut atteindre 5 % pour les personnes vivant à côté d'une décharge à ciel ouvert (alors que ce sont généralement les plus pauvres).

([27], [48], [75])

Pourquoi une bonne gestion des déchets est-elle difficile dans les pays en développement ?

Les pays en développement rencontrent des problèmes à toutes les étapes de la gestion des déchets municipaux :

1. La production des déchets. La production connaît une croissance très rapide et les pays ne sont pas dotés d'une législation visant à la réduire.
2. La collecte et le transport des déchets. La collecte est globalement inefficace car mal organisée. Elle est en particulier très insuffisante dans les zones où vit la population pauvre.
3. Le recyclage, la valorisation des déchets organiques. Le recyclage fait l'objet d'une économie informelle qui est mal intégrée dans l'économie générale, il souffre par conséquent d'un manque de débouchés. C'est particulièrement net pour la production de compost à partir des déchets organiques.
4. L'élimination des déchets. Les déchets finissent dans des décharges à ciel ouvert ou sont brûlés en plein air avec tous les problèmes que cela pose pour la santé et l'environnement. Les Etats n'ont pas les moyens financiers et techniques de construire des décharges conformes aux normes actuelles.
5. La valorisation énergétique des déchets. Les décharges ne sont pas conçues pour valoriser le méthane qui s'en échappe. Il n'y aurait de toute façon généralement pas de débouché pour l'énergie produite.

La Figure 5 résume les difficultés rencontrées par les pays en développement.

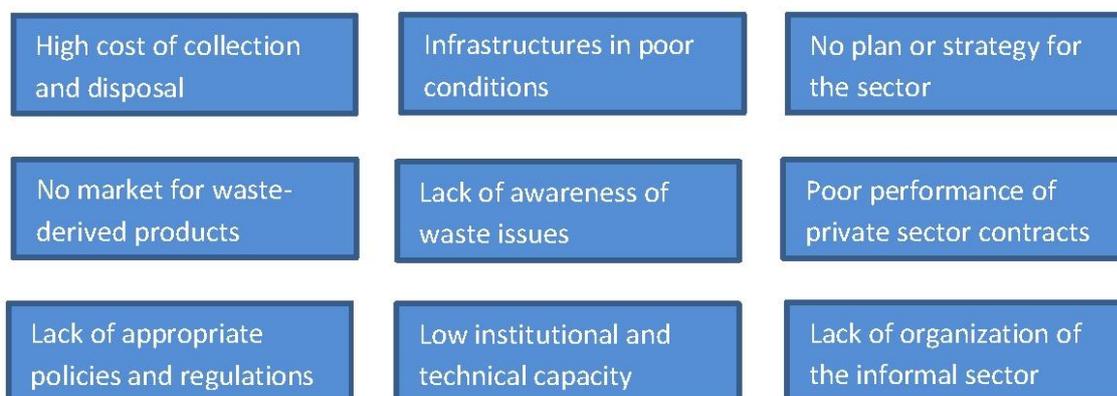


Figure 5. Liste des enjeux qui minent la bonne gestion des déchets municipaux dans les pays en voie de développement ([70] p. 8).

([6] pp. 1-2, [70] p. 6, p. 8)

Existe-t-il des aides internationales pour améliorer la gestion des déchets dans les pays en développement ?

Oui, mais elles restent modestes : 0,09 dollars par habitant du pays bénéficiaire en 2012. Chiffre, à comparer aux 2,43 dollars d'aide pour l'approvisionnement en eau et l'assainissement et aux 31 dollars pour l'ensemble des aides au développement.

Les aides portent principalement sur :

1. Augmentation des capacités et des compétences (34 % des projets financés) : formation du personnel, aide à la mise en place d'une politique en matière de déchets, R&D appliquée aux flux de déchets spécifiques (par exemple les déchets de la production de café au Brésil).
2. Assistance technique (25 % des projets financés) : étude de faisabilité, assistance technique continue, soutien pour la gestion du projet.
3. Développement de l'infrastructure (18 % des projets financés) : création ou développement de la collecte des déchets municipaux et des décharges modernes. Ce sont les projets les plus coûteux.

En 2012, les trois plus gros financeurs étaient l'Allemagne (126 millions de dollars), l'*Asian Development Bank* (125 millions de dollars) et le Japon (110 millions de dollars). Ils fournissaient près des trois-quarts de l'aide mondiale.

Les principaux pays bénéficiaires sont la Chine (540 millions de dollars pendant la période 2003-2012), l'Inde (303 millions de dollars), le Maroc (271 millions de dollars), la Turquie (247 millions de dollars), Azerbaïdjan (221 millions de dollars) et le Viêtnam (213 millions de dollars).

([77] pp. 19-21, p. 28, [119] pp. 239-241)

La tarification incitative est-elle efficace en matière de traitement des déchets ?

L'efficacité des tarifications incitatives pour orienter les comportements en matière de déchets a fait l'objet d'une étude approfondie en Europe. Il ne s'en dégage pas une conclusion claire.

En gros, la mise à la décharge des déchets municipaux diminue lorsque le prix à payer augmente (Figure 6). Cependant le prix est loin d'être le seul déterminant : avec un prix supérieur à 100 euros la tonne, le pourcentage de mise en décharge est entre 50 % et 70 % dans certains pays et inférieur à 5 % dans d'autres.

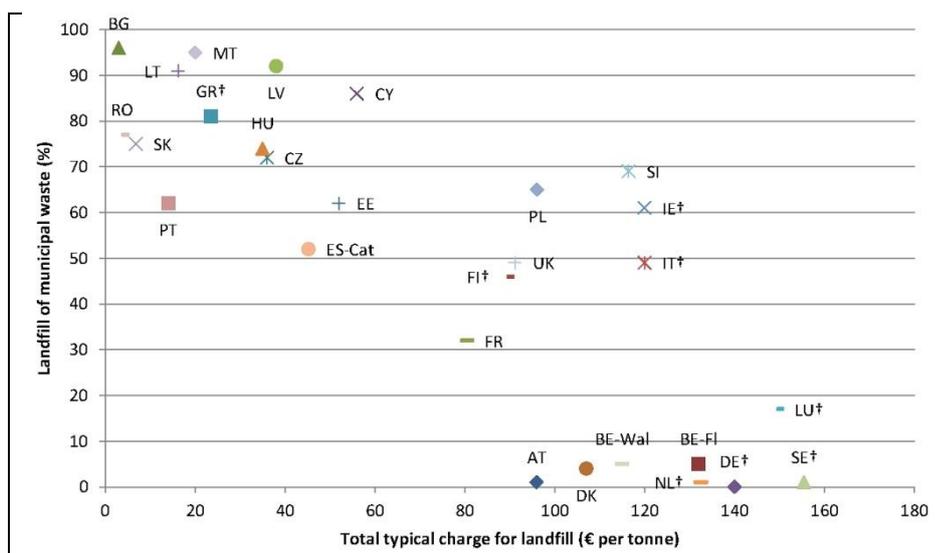


Figure 6. Relation entre le coût total de mise en décharge et le pourcentage des déchets municipaux mis en décharge 2009 ([34] p. 55). Cf. Tableau 1 pour l'abréviation des noms de pays.

On n'observe carrément pas d'effet du prix sur le recours à l'incinération pour les déchets municipaux (Figure 7) ou sur la mise en décharge des déchets de construction (Figure 8).

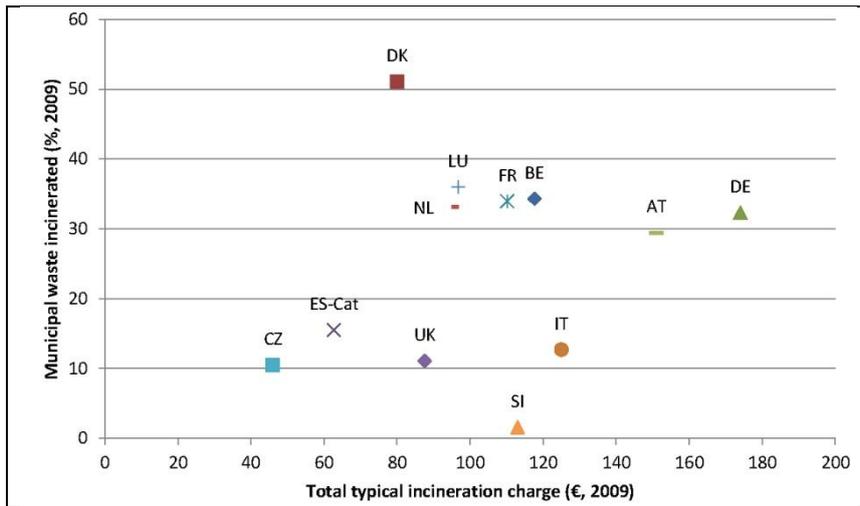


Figure 7. Relation entre le coût total de l'incinération et le pourcentage des déchets municipaux mis en décharge 2009 ([34] p. 78). Cf. Tableau 1 pour l'abréviation des noms de pays.

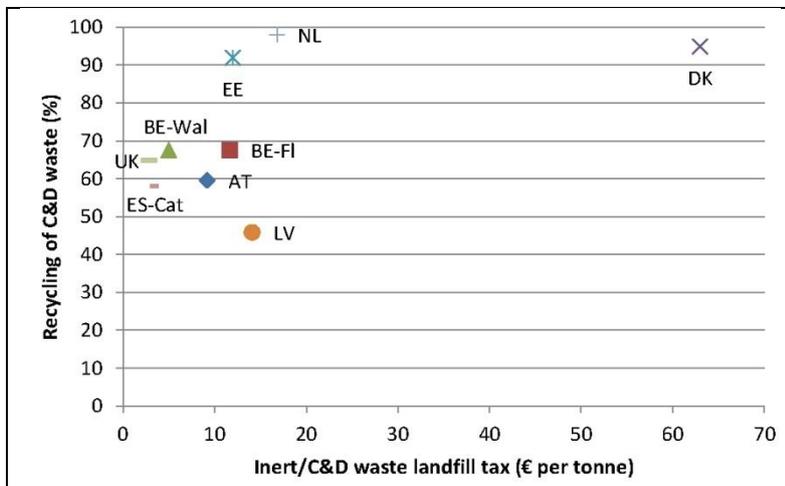


Figure 8. Relation entre le coût total de mise en décharge et le pourcentage des déchets du bâtiment et des travaux publics mis en décharge ([34] p. 64). Cf. Tableau 1 pour l'abréviation des noms de pays.

([34] pp. 3-5, p. 55, p. 64, p. 78, [71], [132])

Le mode de tarification influe-t-il sur la production de déchets ?

Il existe de très nombreuses façons de financer la collecte et le traitement des déchets ménagers (Tableau 5).

	Container identification systems				User identification systems	
	Pay-per-bin with individual tally	Pay-per-bin with pre-determined frequency	Pay-per-bag	Identification and weighing of the bin	Pay-by-volume with a volume chamber incorporated	Pay-by-weight with a weighing system incorporated in to the bin
Prevention and recycling incentive	Average	Low	High	Very high	High	Very high
Technological complexity	High	Low	Low	Very high	Very high	Very high
Implementation cost	High	Average	Low	Very high	Very high	Very high
Maintenance cost	Average	Low	High	Very high	High	High
Reliability and transparency of tax calculation	High	High	High	High	High	High
Certainty of revenue	High	Very high	Average	High	Average	Average
Fraud risk	High	Very high	Average	Low	Average	Average

	Container identification systems				User identification systems	
	Pay-per-bin with individual tally	Pay-per-bin with pre-determined frequency	Pay-per-bag	Identification and weighing of the bin	Pay-by-volume with a volume chamber incorporated	Pay-by-weight with a weighing system incorporated in to the bin
Collection efficiency	High	Low	High	Low	High	High
Correspondence between volume or weight and charge	High	Average	Very high	Very high	High	Very high
Convenience for users	High	High	Average	High	Average	Average

Tableau 5. Comparaison de plusieurs modes de tarifications de la collecte des déchets municipaux ([99] pp. 17-18).

Il est difficile de savoir si le mode de tarification influe sur la quantité de déchets produits par les particuliers car les statistiques sont brouillées par les fortes disparités existant au sein d'un même Etat. Il semble cependant que dans les pays riches une facturation proportionnelle au poids de la collecte tend à diminuer la production de déchets.

Plusieurs méthodes de tarification ont été testées en Chine. La seule qui réduise effectivement la production de déchets par les ménages est la vente des sacs poubelles par le service chargé des déchets municipaux (*Pay-per-bag*).

La priorité est différente dans les pays en développement : il s'agit avant tout d'instaurer une gestion moderne des déchets en subventionnant au besoin des mouvements associatifs au prorata de leur participation à la collecte et au tri. La référence [70] détaille le fonctionnement de quelques *success stories*.

En 2014, le Sénat a souligné le danger de certains modes de tarification : *La collecte et le traitement des ordures ménagères doivent avant tout être considérés comme un service public, qui participe à la salubrité et à la santé publiques. Dès lors, il importe de ne pas s'engager excessivement dans la voie d'un financement lié au service rendu, afin de ne pas transformer ce service public en une prestation au tarif individualisé.*

([23], [34] pp. 5-6, pp. 86-92, [61] p. 5, [62] p. 109, [70], [84], [91], [99] pp. 15-24)

Peut-on réduire la quantité de déchets municipaux en agissant en amont des ménages ?

Les pouvoirs publics peuvent réduire la production de déchets municipaux en incitant les industriels à diminuer le plus possible les emballages. En effet, les emballages constituent plus de la moitié du poids des déchets municipaux dans les pays riches (cf. la question *Quelle est la composition des déchets municipaux ?*). L'Union européenne a publié en 1994 une directive à ce sujet (transcrite en droit français en 1998). Elle a permis de stabiliser la quantité de déchets d'emballages (Figure 9).

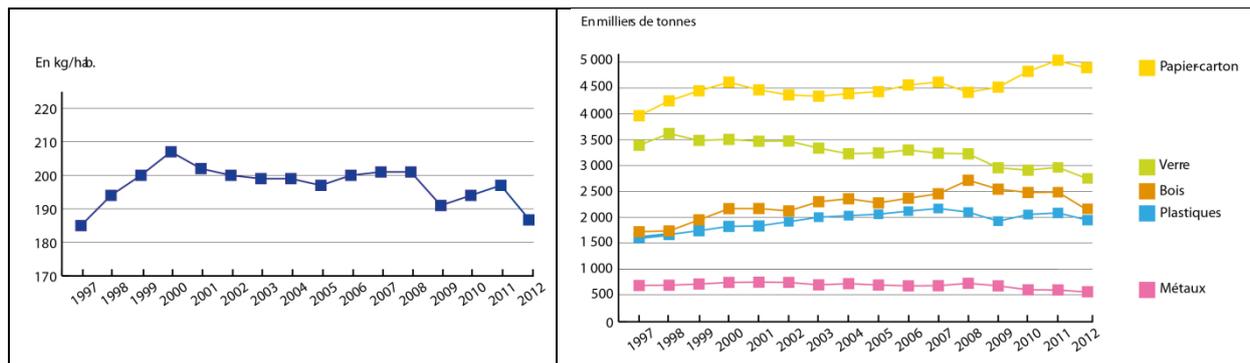


Figure 9. Evolution de la production de déchets d'emballages (83).

Lorsqu'il y a une alternative, les pouvoirs publics peuvent interdire les objets dont les déchets posent problème. C'est le cas par exemple pour les sacs constitués d'un film plastique ultra-mince (ceux que distribuaient les supermarchés). Le Bangladesh les a interdits dès 2002, la Chine en 2008. En 2013, la Commission a proposé aux Etats membres de réduire l'utilisation des sacs en plastique. Ils seront interdits en France à partir de juillet 2016.

Ces sujets ne sont pas du ressort de gouvernement fédéral aux Etats-Unis.

([1], [12], [76], [83], [94], [146], [148])

Les déchets aujourd'hui

Quelle est la part des déchets municipaux dans l'ensemble des déchets ?

Dans l'Union européenne, près de deux-tiers des déchets proviennent des secteurs de la construction, des mines et des carrières. Il s'agit majoritairement de déchets inertes réutilisés dans les travaux publics (ex : remblais, sous-couche routière). Les déchets industriels, les déchets municipaux et les boues des stations d'épuration représentent 70 % des déchets restants (Figure 10). Les trois catégories sont à peu près égales.

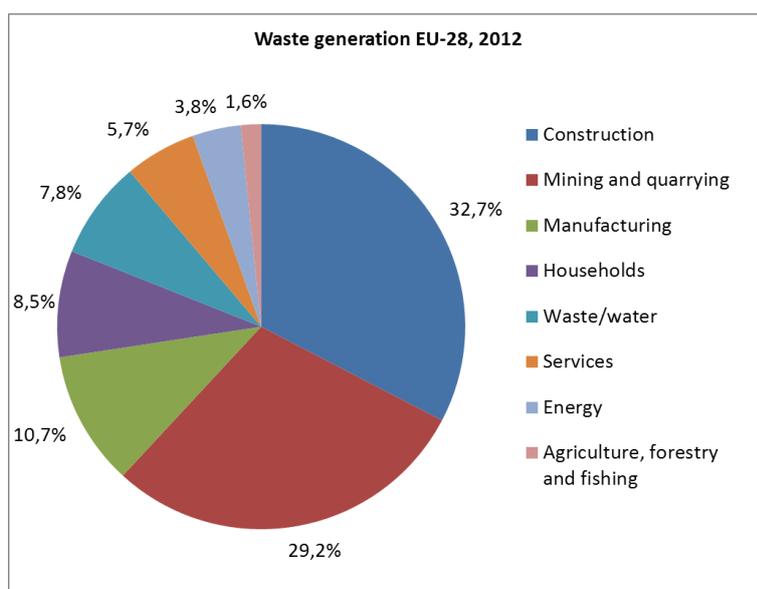


Figure 10. Production de déchets par secteurs économiques dans l'Europe des 28 en 2012 ([127]).

Les proportions relatives des différents types de déchets reflètent l'activité économique. Elles sont naturellement très différentes en Chine : il y a 19 fois plus de déchets industriels que de déchets municipaux.

([28] p. 13, [92], [127], [128])

Quelle est la quantité de déchets municipaux par habitant ?

A l'échelle mondiale, la production de déchets est à peu près proportionnelle au revenu des habitants (Figure 11).

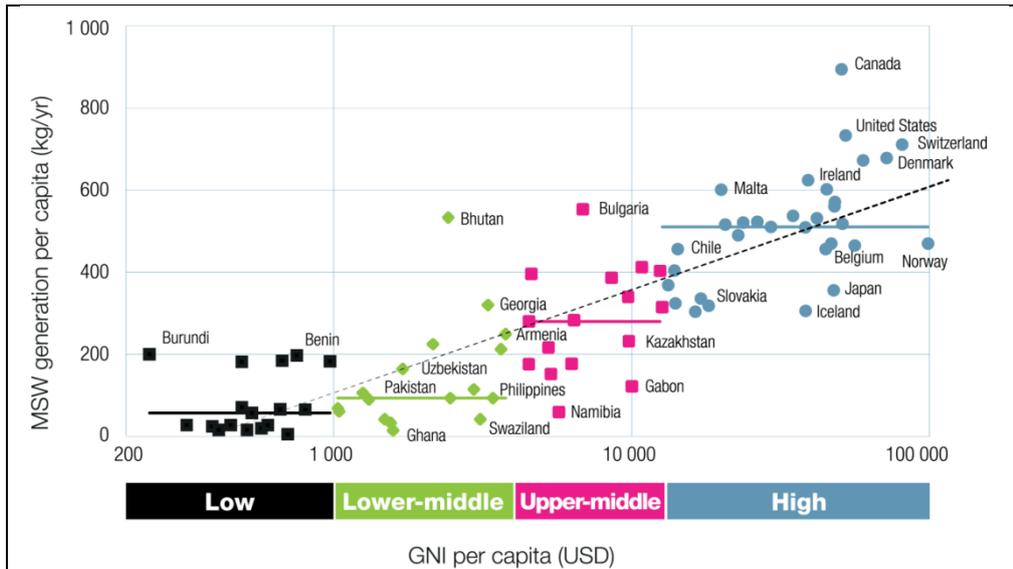


Figure 11. Relation entre la production de déchets par habitant et le revenu des habitants estimée sur un échantillon de 82 pays en utilisant la statistique la plus récente de la période 2005-2010 ([119] p. 55).

En 2013, la production de déchets municipaux était en moyenne de 480 kilogrammes par habitant dans l'Europe des 28 (Figure 12). Elle allait de 250 kg en Roumanie et 750 kg au Danemark.

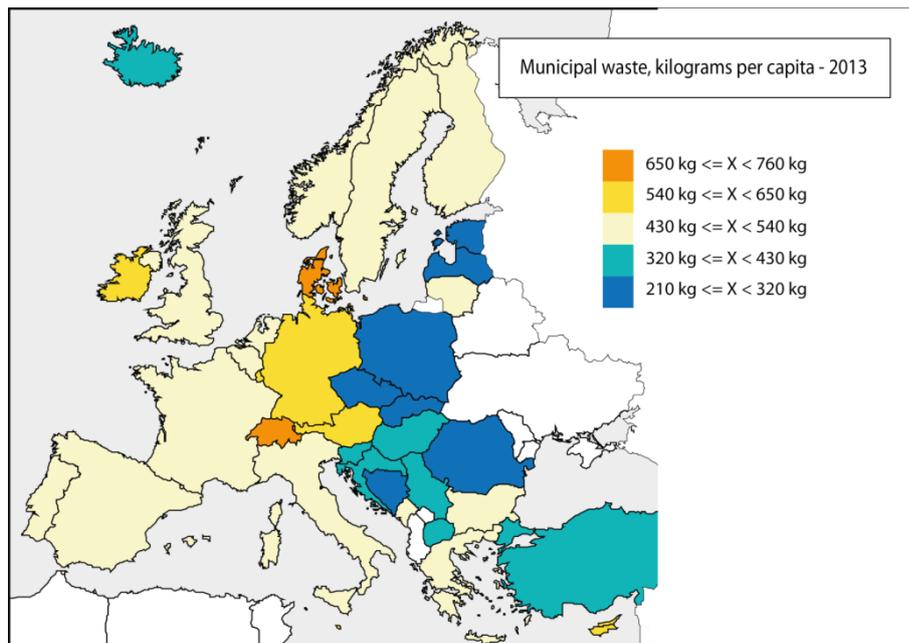


Figure 12. La production moyenne de déchets municipaux était de 480 kg par habitant en 2013 dans l'Europe des 28 ([138]). Les pays sont laissés en blanc lorsque les données ne sont pas disponibles. Le fond de carte vient de [28].

En 2013, la production de déchets municipaux en Chine était en moyenne de 240 kilogrammes par habitant dans les villes, soit moitié moins qu'en Europe (Figure 13). Elle allait de 140 kg dans le Guangxi (une province agricole à la frontière du Viêt Nam) à 370 kg à Beijing.

L'efficacité de la collecte des déchets progresse rapidement en Chine : 71 % en 2009, 80 % en 2011, 89 % en 2013 (à titre de comparaison, elle était de 98 % dans l'Europe des 28 en 2013).

NB Les statistiques officielles chinoises ne donnent que la quantité de déchets municipaux par habitant dans les villes, elles ne couvrent que 54 % de la population. On trouve encore des décharges sauvages dans les zones rurales proches des villes (les auteurs chinois parlent de "waste siege").

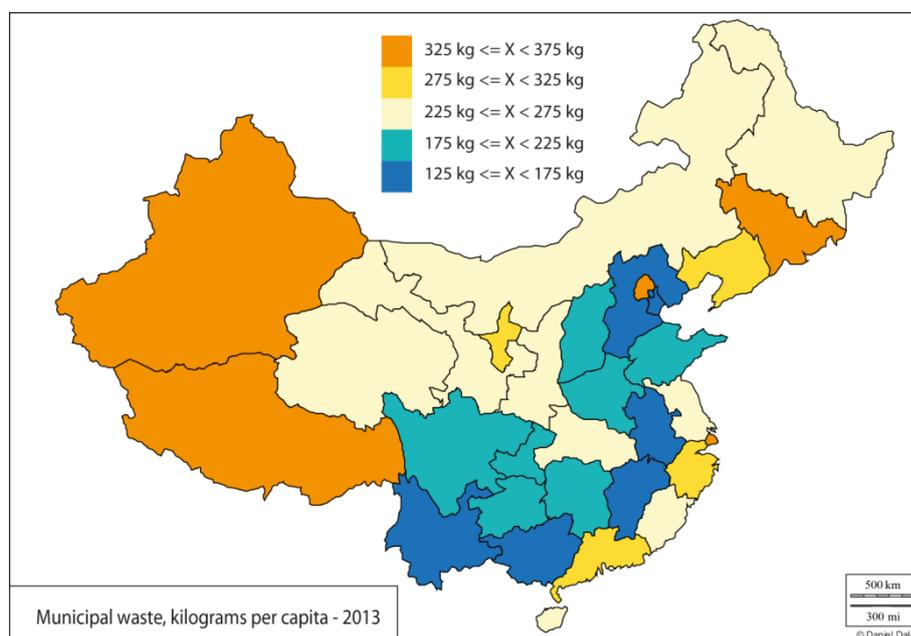


Figure 13. La production moyenne de déchets municipaux en Chine était de 240 kg par habitant dans les villes en 2013, soit moitié moins qu'en Europe ([92]). Le fond de carte vient de [28].

La production moyenne de déchets municipaux aux Etats-Unis était de 730 kg par habitant en 2013, soit 1,5 fois plus qu'en Europe.

Les statistiques de la production de déchets municipaux sont des ordres de grandeurs. En effet, il existe des différences entre les pays dans la façon de prendre en compte les collectes sélectives réalisées par le secteur privé et les déchets produits par les activités commerciales.

([28], [63], [66], [92], [111], [119] p. 55, [138])

Quelle est la composition des déchets municipaux ?

Les déchets municipaux contiennent principalement :

- des déchets organiques (ex : restes de nourriture, jardinage),
- du papier et du carton (ex : journaux, emballages),
- du plastique (ex : bouteilles en plastique, emballages),
- du verre (ex : bouteilles vides)

- et du métal (ex : cannettes, boîtes de conserve).

Les déchets organiques, le papier et le carton font ensemble plus de la moitié du poids des déchets municipaux (Figure 14).

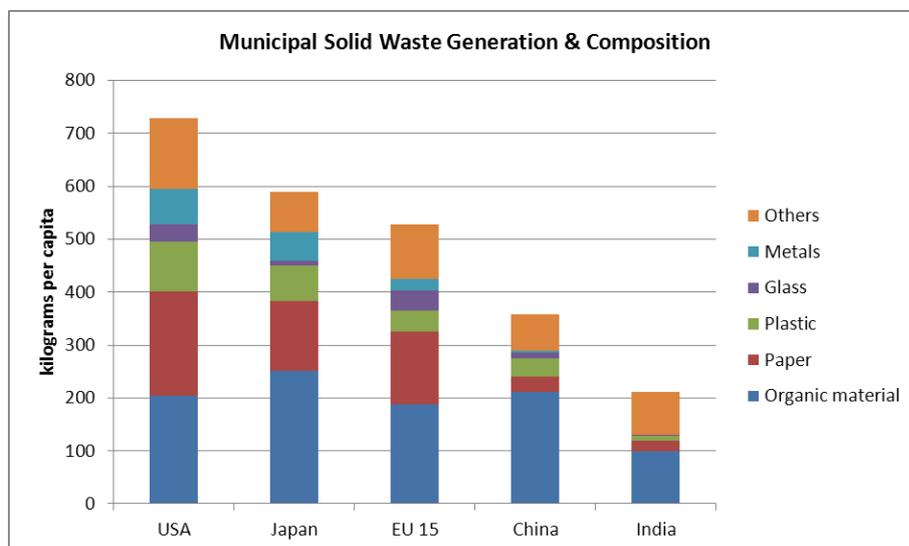


Figure 14. Production et composition des déchets municipaux dans les trois grandes aires économiques, au Japon et en Inde ([111], [37], [115]).

Il faut noter que la production de déchets organiques est quasiment la même aux Etats-Unis et en Chine (respectivement 205 et 210 kg par habitant et par an) alors que la production totale de déchets varie du simple au double. La principale différence vient des déchets de papier et d’emballages : les Etats-Unis en produisent cinq fois plus que la Chine. La production de déchets, toutes catégories confondues, est beaucoup plus faible en Inde (210 kg par habitant et par an).

([37], [111], [115], [119] p. 57)

Que sait-on de la production de déchets dans le tiers-monde ?

On connaît mal la production de déchets dans le tiers-monde en dehors des très grandes villes. Il faut toutefois noter les résultats d’une étude très complète réalisée au Ghana en 2014. Pour autant qu’on puisse le vérifier, les conclusions de l’étude semblent généralisables à l’ensemble de l’Afrique subsaharienne.

La quantité de déchets municipaux est en moyenne de 170 kg par habitant et par an pour l’ensemble du pays. Elle est deux fois plus élevée dans les grandes villes que dans les zones rurales (Tableau 6).

Areas	Total kg/person/year	Organic	Paper	Plastic	Glass	Metal	Other
Ghana	172	106	7	22	5	6	26
Metropolitan	229	137	13	29	6	7	37
Municipal	143	91	7	15	3	4	23
District	101	63	4	23	3	3	5
Coastal zone	204	131	11	18	5	6	33
Forest zone	192	114	10	25	5	7	31
Northern Savanna	105	60	4	22	3	3	13
China	358	211	29	36	11	7	64

Tableau 6. Production annuelle de déchets municipaux par personne dans différentes aires géographiques du Ghana et composition des déchets ([118] pour le Ghana et [37] pour la Chine). L’activité économique se déroule principalement dans la zone côtière.

A l'échelle du pays, la production de déchets municipaux est globalement deux fois plus faible qu'en Chine. Les déchets de papier et les métaux font exception ; les premiers sont quatre fois moins abondants qu'en Chine et les second 50 % plus fréquents. On observe aussi un excès de déchets en plastique dû à la généralisation des bouteilles d'eau et des objets préemballés.

Le PIB par habitant est de 4,3 dollars, ce qui place le Ghana au 175^e rang mondial, et 24 % de la population est sous le seuil de pauvreté. C'est un *lower-middle income country* (Figure 11).

([23] pp. 11-12, [37], [48], [75], [118], [139])

Met-on encore souvent les déchets municipaux directement à la décharge ?

Oui. En 2013, 30 % des déchets municipaux étaient mis à la décharge sans valorisation préalable dans l'Europe des 28 (mais 11 % seulement dans l'Europe des 15), 53 % aux Etats-Unis et 68 % en Chine. Le taux de mise en décharge est cependant très variable au sein de chaque aire économique (Figure 15) :

- En Europe, elle est inférieure à 2 % en Allemagne, en Belgique, au Danemark, aux Pays-Bas, en Suède et en Suisse et supérieure à 80 % en Croatie, en Grèce, en Lettonie, à Malte et en Roumanie.
- Aux Etats-Unis, elle est inférieure à 20 % dans le Connecticut, le Maine et le Massachusetts et supérieure à 90 % en Alaska, dans l'Arizona, la Géorgie, l'Idaho, le Mississippi et l'Oklahoma.
- En Chine, elle est inférieure à 40 % dans le Fujian, le Jiangsu et le Yunnan et supérieure à 98 % dans le Gansu, le Guizhou, le Jiangxi, le Ningxia, le Qinghai, le Shaanxi et au Tibet.

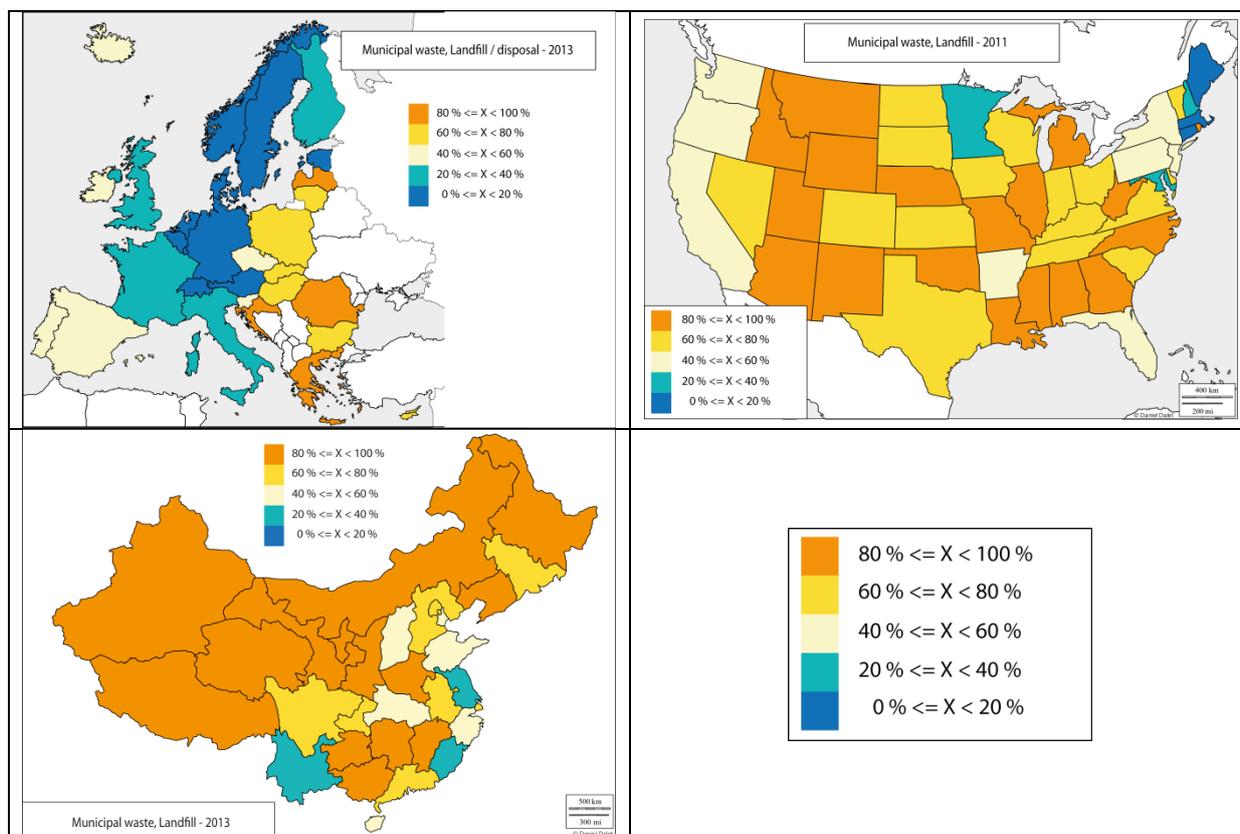


Figure 15. Pourcentage des déchets municipaux mis à la décharge sans valorisation préalable en Europe, aux Etats-Unis et en Chine ([59] p. 22, [92], [138]). Les fonds de carte viennent de [28].

Il faut noter que les décharges modernes sont des installations techniques très réglementées, elles n'ont rien de commun avec des décharges sauvages (cf. la question *Qu'est-ce qui caractérise une décharge moderne ?*).

([7] p. 319, pp. 495-496, [16] p. 30, [28], [59] p. 22, [92], [138])

L'incinération des déchets municipaux est-elle une solution répandue ?

L'incinération des déchets municipaux est une solution répandue en Europe (Figure 16). En 2013, elle représentait 44 % du traitement des déchets municipaux (en poids) dans l'Europe des 15 et 26 % dans l'Europe des 28. Elle est aussi très utilisée en Chine (30 % des déchets pour l'ensemble du pays), et plus particulièrement dans les provinces côtières (Figure 16). Ce sont les provinces les plus riches et les plus peuplées.

L'incinération des déchets est en revanche exceptionnelle aux Etats-Unis puisqu'elle ne concernait en 2013 que 13 % des déchets (en poids). On la trouve principalement le long de la côte nord-est des Etats-Unis et en Floride (Figure 16). Elle n'est utilisée pour plus de 25 % des déchets que dans le Connecticut, le District of Columbia, le Maine et le Massachusetts.

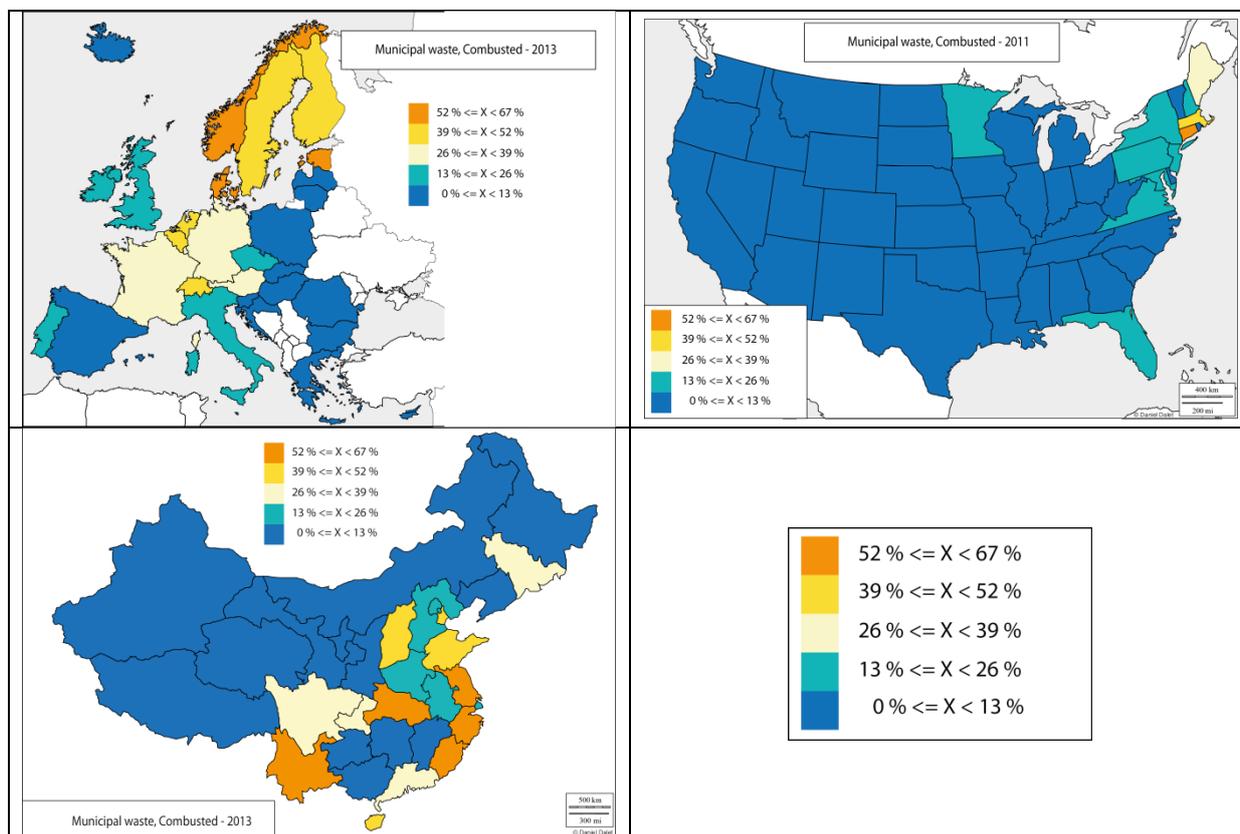


Figure 16. Pourcentage des déchets municipaux incinérés en Europe, aux Etats-Unis et en Chine ([59] p. 22, [92], [138]). Les fonds de carte viennent de [28].

([28], [59] p. 22, [92], [105] p. 14, [138])

Le recyclage est-il la norme dans le monde ?

En 2013, 43 % des déchets (en poids) partaient au recyclage dans l'Europe des 28 (et même 46 % dans l'Europe des 15) alors que la proportion étaient de 34 % aux Etats-Unis (Figure 17).

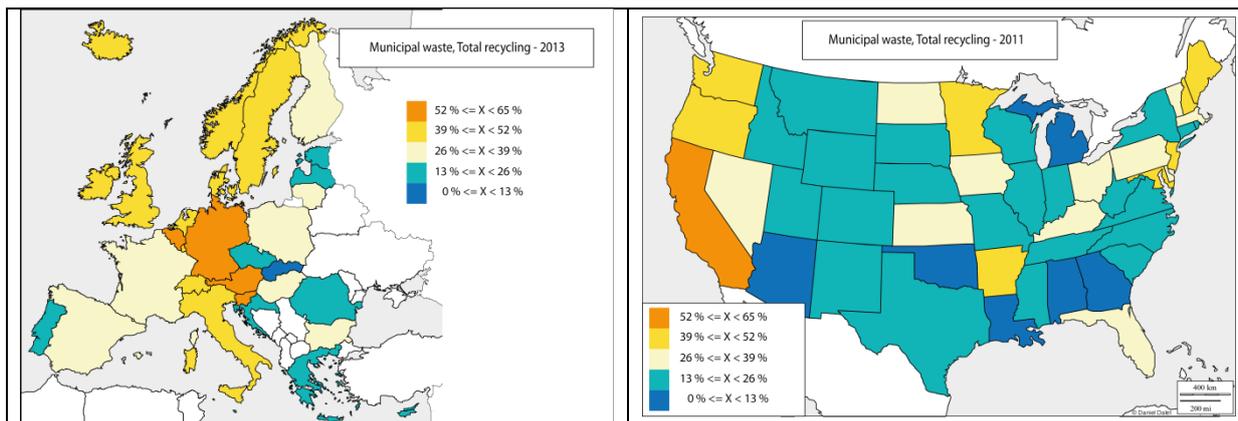


Figure 17. Pourcentage des déchets municipaux allant au recyclage en Europe et aux Etats-Unis ([59] p. 22, [138]). Les fonds de carte viennent de [28]. Le terme recyclage recouvre aussi bien les matériaux qui seront réutilisés en tant que tel (ex : papier, plastiques, verre, métaux) que les matières organiques qui seront compostées.

Dans les textes officiels, le terme recyclage recouvre aussi bien les matériaux qui seront réutilisés en tant que tel (ex : papier, plastiques, verre, métaux) que les matières organiques qui seront compostées. Cependant les statistiques séparent généralement les deux types de produits (Figure 18 et Figure 19). Aux Etats-Unis, six Etats atteignent l'efficacité de l'Allemagne et de la Slovénie pour le recyclage des matériaux. En revanche, la production industrielle de compost y est très peu développée.

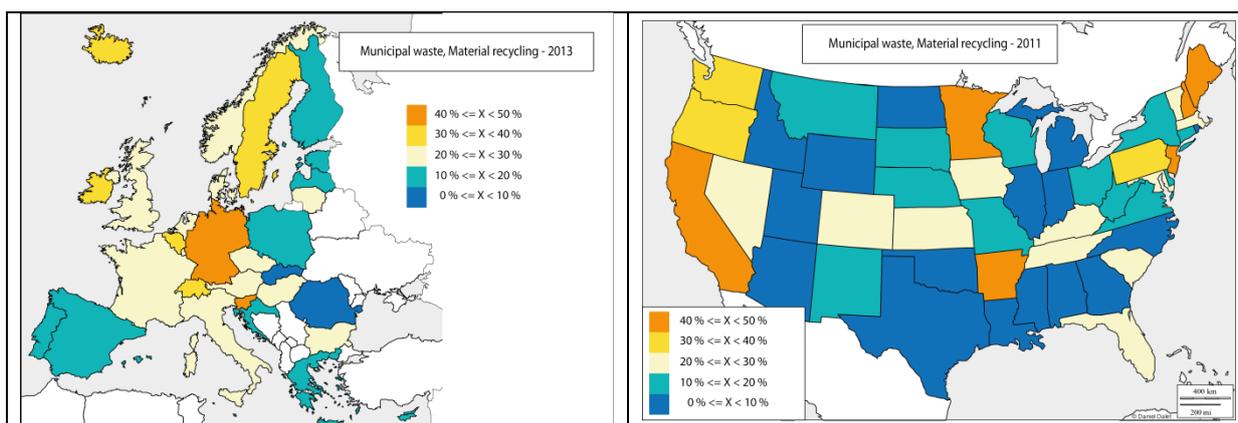


Figure 18. Pourcentage des déchets municipaux partant au recyclage pour récupérer les matières premières (ex : papier, plastiques, verre, métaux) en Europe et aux Etats-Unis ([59] p. 22, [138]). Les fonds de carte viennent de [28].

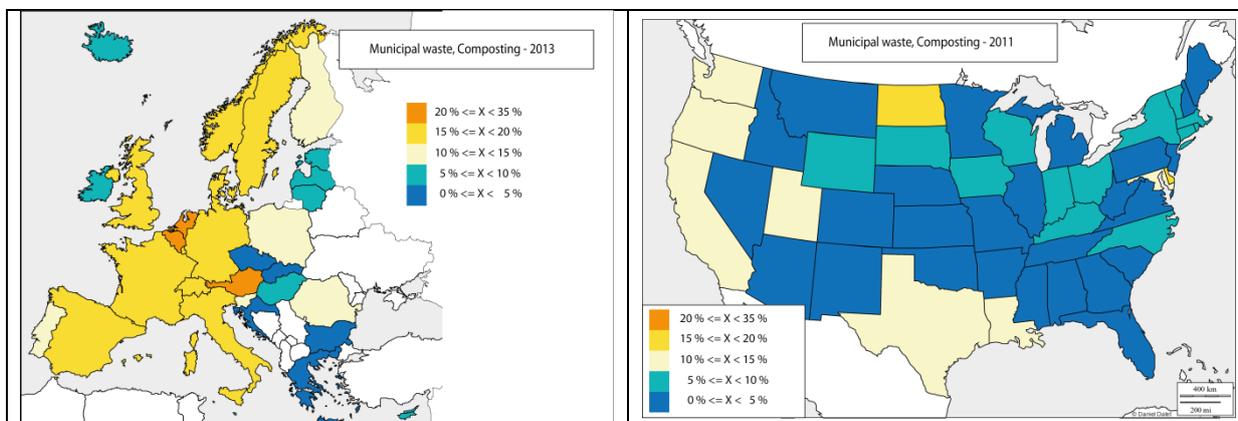


Figure 19. Pourcentage des déchets municipaux partant au compostage en Europe et aux Etats-Unis ([59] p. 22, [138]). Note : Il s'agit du compostage réalisé dans une installation spécialisée et non à domicile. Les fonds de carte viennent de [28].

La gestion des déchets d'emballage montre que le point fort des Etats-Unis est le recyclage du papier-carton, ils sont en revanche très en retard pour le recyclage du verre et des plastiques (Figure 20).

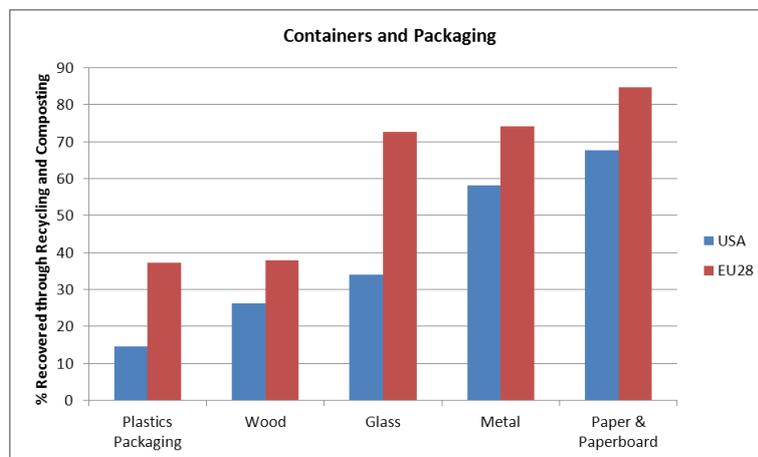


Figure 20. Pourcentages du tonnage de déchets d'emballages recyclés en 2013 aux Etats-Unis et dans l'Europe des 28 ([112], [143]).

En Chine, le recyclage est le fait d'une économie parallèle très active qui n'est pas prise en compte par les statistiques officielles.

C'est le cas aussi dans la plupart des pays en développement.

([6] pp. 1-2, pp. 85-86, pp. 227-228, [14], [26] pp. 10-11, [28], [59] p. 22, [105] p. 14, [112], [138], [143])

Les décharges

Qu'est-ce qui caractérise une décharge moderne ?

Trois critères caractérisent une décharge moderne ("*sanitary landfill*" dans la littérature technique anglo-saxonne) :

- Les déchets sont compactés pour diminuer le plus possible le volume de la décharge.
- Les déchets sont recouverts de terre tous les jours pour éviter qu'ils polluent les environs.
- La décharge est conçue de façon à limiter le plus possibles les risques pour la santé humaine et l'environnement.

Les décharges modernes sont désignées de plusieurs façons dans la littérature technique française. On trouve par exemple *Centre d'enfouissement technique*, *Centre de stockage de déchets ultimes*, *Centre de stockage de déchets ménagers et assimilés*, *Installation de stockage de déchets non dangereux* (ce dernier est le terme légal).

Une décharge a une durée de vie de quinze-vingt ans, après quoi il faut trouver un nouveau site. La décharge d'une ville de 100 000 habitants occupe typiquement 100 hectares (Figure 21).

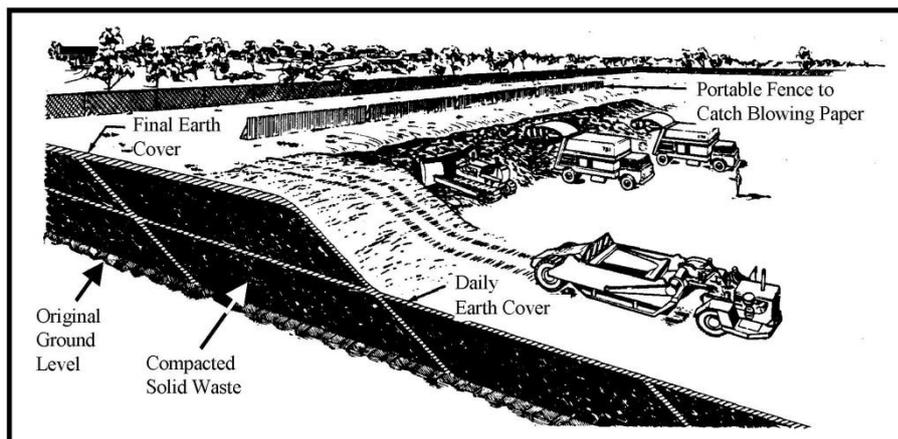


Figure 21. Schéma d'une décharge moderne ([32] p. 345).

([16] p. 30, [32] pp. 323-224, p. 332, p. 345, p. 424, [42])

Une décharge moderne coûte-t-elle chère ?

Les niveaux de performance des décharges, et donc le prix de revient, sont très variables (Figure 22). Le niveau 1 correspond à une simple décharge à ciel ouvert avec une clôture et une récupération des eaux de ruissellement. Les décharges modernes ("sanitary landfill") sont de niveau 2 ou plus, elles sont équipées pour capter le biogaz. Dans les décharges les plus performantes (niveau 4), le lixiviat est collecté, traité et réintroduit dans les déchets (Figure 23).

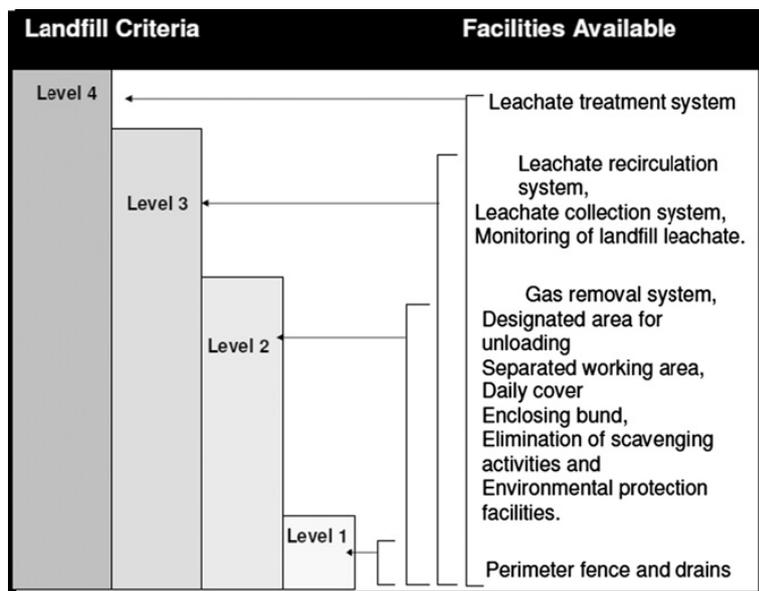


Figure 22. Les niveaux de performance des décharges ([43]).

Une décharge de niveau 4 est une installation complexe, et donc chère, avec un prix de revient autour de 30-35 euros par tonne de déchets enfouis (prix constaté un peu partout dans le monde). L'investissement initial équivaut à deux années de fonctionnement. La valorisation du biogaz peut couvrir jusqu'à 10 % du prix de revient. NB le prix facturé est beaucoup plus élevé dans une partie de l'Europe, il est par exemple autour de 80 euros la tonne en France (Figure 6).

Bien que les politiques en matière de déchets visent partout à généraliser les décharges de niveau 4, elles sont encore souvent de niveau 2 dans les pays en développement. Elles assurent un certain niveau de protection de la santé et de l'environnement pour un prix de revient de l'ordre de 4-8 euros la tonne de déchets enfouis.

([4] p. 29, [11] p. 18, [17], [32] pp. 421-427, [43], [57] p. 11, [70] p. 31, [71])

Que deviennent les déchets enfouis dans une décharge ?

Les déchets enfouis dans une décharge sont soumis à deux types de dégradation :

- Ils sont dissous par l'eau circulant dans la décharge (le lixiviat). L'eau qui s'écoule d'une décharge est très polluée, notamment par des métaux.
- Les déchets biodégradables sont décomposés par les microorganismes. Une partie des produits de dégradation sont volatiles, ils constituent le biogaz (ou gaz de décharge). Les principaux constituants du biogaz sont le méthane, le gaz carbonique et des polluants soufrés. Les matières organiques résiduelles sont stables.

Plusieurs précautions sont prises pour limiter les effets nocifs sur la santé et l'environnement (Figure 23) :

- Le fond d'une décharge est étanche pour éviter les écoulements d'eau polluée.
- Les déchets sont recouverts d'une couche de terre plus ou moins imperméable pour limiter les infiltrations d'eau.
- Un réseau de drainage permet de récupérer et de traiter les liquides qui sortent de la décharge.
- Le biogaz produit par la décomposition de la matière organique est brûlé sur place ou vendu comme source d'énergie. Il est important de brûler le méthane car c'est un gaz à effet de serre plus puissant que le CO₂.

La vitesse de dégradation est très dépendante de la température et de l'humidité. La décomposition des produits biodégradables est particulièrement efficace dans les régions humides et chaudes, elle peut entraîner une diminution du volume des déchets atteignant 20 % dès la première année. Cette décomposition est en revanche très lente dans les régions arides (le volume diminue de 3 % en trois ans).

Une circulation contrôlée du lixiviat au sein de la décharge accélère la production de biogaz. En Europe par exemple, plus de 95 % du biogaz est produit en moins de dix ans au lieu de vingt à trente ans quand les choses suivent leur cours naturel.

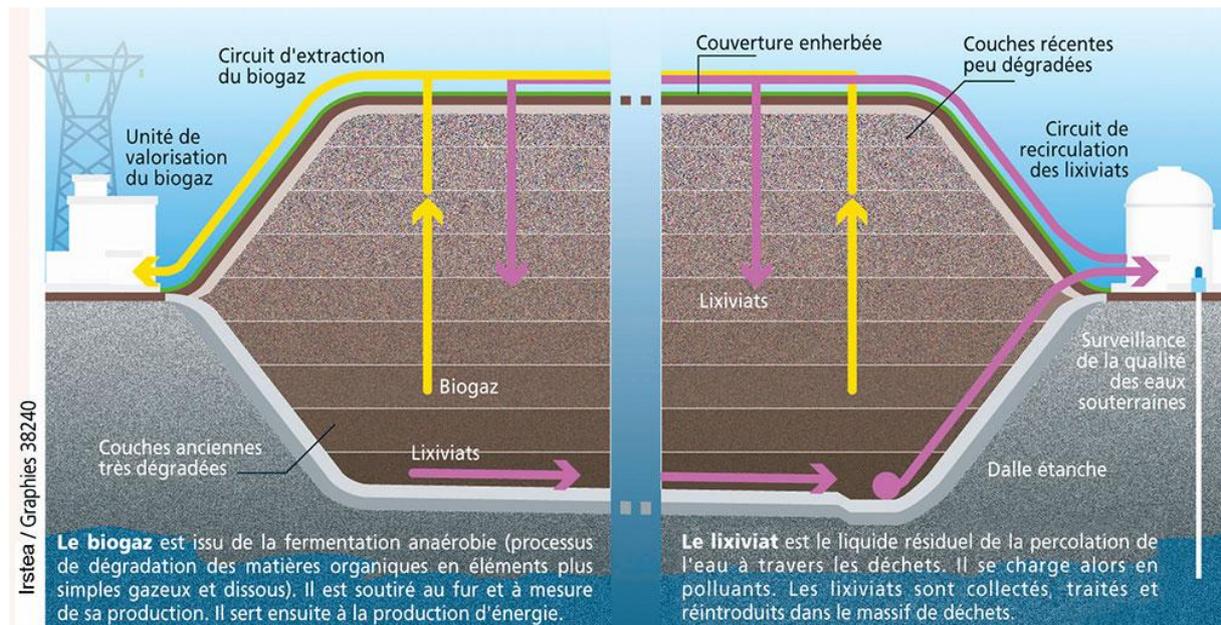


Figure 23. Représentation schématique d'une décharge moderne de niveau 4 ([42]).

([16] p. 18, [18], [30], [32] pp. 324-328, pp. 390-391, [42])

Quel est le cycle de vie d'une décharge moderne ?

Il faut tout d'abord faire accepter le projet par les pouvoirs publics et surtout la population. C'est généralement compliqué. Ensuite, la décharge est exploitée pendant dix à vingt ans. Puis vient la post-exploitation.

La période de post-exploitation commence par un réaménagement du site. Il s'agit de mettre en place une couverture végétale et un aménagement paysager, de drainer le biogaz et de l'envoyer à la torchère ou à l'unité de valorisation.

La décharge fait l'objet d'un suivi pendant au moins trente ans afin d'évaluer les émissions de polluants et leurs effets sur son environnement. En effet la décomposition des matières organiques présentes dans les déchets se poursuit pendant des décennies avec comme conséquences :

- La décharge s'affaisse tant qu'il reste des produits biodégradables.
- Les émissions de biogaz restent importantes pendant les vingt ans qui suivent la fermeture de la décharge et sont encore notables au bout de cinquante ans.
- Il y a un risque de fuites d'eau polluée si le revêtement de la décharge se fissure. Les experts considèrent que la contamination des nappes phréatiques est le principal risque avec les décharges modernes.

Le suivi continue tant qu'il y a une production significative de biogaz ou d'eau polluée.

([10], [30], [32] pp. 343-344, [71])

Comment la période post-exploitation est-elle gérée ?

La période post-exploitation demande un suivi régulier de la décharge, ce qui pose le problème de la responsabilité de son propriétaire et du financement. Les obligations du propriétaire diffèrent selon les pays :

1. La solution la plus fréquente est une responsabilité limitée dans le temps. Elle est au minimum de trente ans dans l'Union européenne et aux Etats-Unis. Le propriétaire sait exactement à quoi s'en tenir, le risque est porté par la collectivité.
2. Les pouvoirs publics peuvent exiger que les émissions polluantes soient inférieures à un seuil donné avant de libérer le propriétaire de ses obligations. La collectivité sait à quoi s'en tenir, le risque est porté par le propriétaire.
3. Les deux solutions peuvent être combinées. La responsabilité post-exploitation a une durée minimum et va jusqu'à ce que le site ne présente plus de risques de pollution ou d'accident. C'est le cas par exemple en France.

Le coût du suivi pendant la période post-exploitation est de l'ordre de 3 à 5 euros par an et par tonne de déchets enfouis dans la décharge. Ce coût est inclus dans le prix du service pendant la période d'activité de la décharge.

([10], [30], [71], [96])

Peut-on raccourcir la période post-exploitation ?

Oui, la longueur de la période post-exploitation résulte d'un choix : optimiser la production de biogaz. Il est possible au contraire de se fixer comme objectif une stabilisation très rapide de la décharge en supprimant le plus rapidement possible la production de biogaz. C'est le cas des décharges menées en semi-aérobie : la production de biogaz est quasi nulle au bout d'un an (Figure 24).

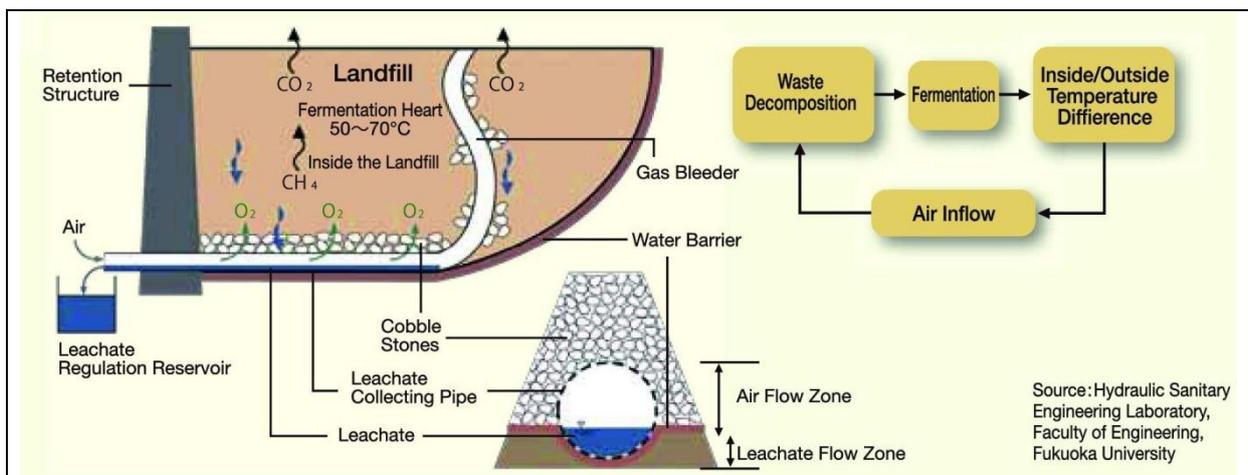


Figure 24. Décharge menée en semi-aérobie pour limiter le plus possible la production de biogaz ([74] p. 26).

Les décharges semi-aérobies sont fréquentes au Japon car elles ne bloquent pas les terrains pendant des décennies. Elles correspondent aussi tout à fait aux besoins des pays en développement qui n'ont de toute façon pas les moyens de valoriser le biogaz.

([3], [74] pp. 26-27, [86])

Quelles sont les objections du public face à un projet de décharge ?

"It may be difficult to dispel the suspicion almost universally held by the public regarding governmental regulations" [32]. Les objections diffèrent selon le niveau de vie :

Les plus pauvres craignent légitimement de perdre leur seul moyen d'existence dans les pays où la collecte sélective et le recyclage sont le fait d'une économie parallèle. Il est possible d'organiser le

travail sur la décharge de telle sorte qu'ils continuent à gagner leur vie. Il est en revanche difficile de résoudre les conflits d'espace, les plus déshérités habitant généralement aux seuls endroits où l'on peut installer une décharge.

Les objections de la classe moyenne portent sur les risques pour la santé, la qualité de vie et la valeur des propriétés au voisinage de la décharge. L'argument de la perte de valeur des propriétés est très difficile à contrer.

Les plus riches ne se sentent qu'indirectement concernés car la décharge sera de toute façon loin de chez eux. Ils sont surtout sensibles aux risques plus globaux pour la santé et l'environnement (ex : détérioration des ressources en eau).

([32] pp. 427-430)

Que faire des anciennes décharges ?

On peut réhabiliter les anciennes décharges (le plus souvent des décharges illégales ou sauvages) en les recouvrant de gravats, puis d'une couche de terre (au moins un mètre d'épaisseur) et de végétaux. Malgré tout, la réhabilitation n'est que partielle et n'évite pas les infiltrations de produits toxiques dans le sous-sol et les eaux souterraines. Le site rénové peut être utilisé comme aire de jeux, centre équestre, etc. Par contre, le sol n'est pas suffisamment stable pour permettre des constructions importantes.

Une alternative est de vider la décharge pour réhabiliter le site et de valoriser autant que faire se peut les matériaux. Cette opération est connue sous le terme de *landfill mining*.

La Corée du Sud envisage ainsi de produire de l'énergie avec le contenu de toutes ses anciennes décharges.

([16] p. 19, [79])

Le *landfill mining* a-t-il un intérêt économique ?

Une abondante littérature traite de la possible valorisation des déchets enfouis dans une décharge, le *landfill mining*. Au-delà des considérations générales sur le "*sustainable material management*", il y a le cas très concret où il faut vider une décharge de déchets municipaux à cause de l'extension de la zone urbaine et enfouir les déchets ailleurs. L'opération est coûteuse, il est logique d'essayer de la financer en valorisant les matériaux extraits de la décharge.

Bien que le contenu d'une décharge change au cours du temps avec la décomposition des matières organiques, il reste toujours une fraction importante de matières combustibles (Tableau 7).

	Belgium	Finland	Sweden	China	Thailand
Soil	45,0	52,0	60,0	75,0	34,0
Stone	2,0	0,0	16,0	8,3	3,3
Combustible	46,2	42,0	20,6	14,7	42,3
<i>Plastic</i>	25,0	23,0	4,4	10,6	31,0
<i>Paper</i>	14,0	5,0	7,2	0,2	3,3
<i>Wood</i>	4,1	7,0	7,2	2,4	8,0
<i>Textile</i>	3,1	7,0	1,8	1,5	0,0
Glass	0,5	0,0	0,5	0,6	6,5
Metal	2,2	3,0	1,6	0,4	6,4
Other	4,1	3,0	1,3	1,0	7,5

Tableau 7. Composition d'une décharge cinq à dix ans après l'enfouissement des déchets ([38], [47], [82]).

Il s'agit principalement de fragments de sacs en plastiques. Le plastique est trop dégradé pour être recyclé, mais il constitue en revanche une bonne source d'énergie. Il s'agit malgré tout d'un plastique riche en composés chlorés qui génèrent de la dioxine lors de la combustion. Il ne peut être brûlé sans risque que dans des incinérateurs modernes.

La récupération des quelques pourcents de débris métalliques n'est pas rentable avec les techniques actuelles.

La concentration des métaux lourds et assimilés dans la terre de la décharge ne diffère pas de ce qu'on trouve habituellement dans des terrains non-contaminés.

([29], [38], [47], [60], [68], [82])

Les biodéchets

Qu'est-ce qu'un biodéchet ?

Le terme *biodéchet* est défini dans la directive 2008/98/CE : *les déchets biodégradables de jardin ou de parc, les déchets alimentaires ou de cuisine issus des ménages, des restaurants, des traiteurs ou des magasins de vente au détail, ainsi que les déchets comparables provenant des usines de transformation de denrées alimentaires.*

La future directive devrait élargir cette définition en la complétant par : *ainsi que les autres déchets présentant des propriétés de biodégradabilité similaires et qui sont comparables par leur nature, leur composition et leur volume.*

([14], [125])

Jette-t-on beaucoup de nourriture ?

On distingue deux cas de figures dans les statistiques : les pertes tout au long de la chaîne d'approvisionnement, du champ aux grossistes, et les pertes chez les détaillants et les particuliers. Seules ces dernières sont comptabilisées comme déchets alimentaires, on les retrouve généralement dans les déchets municipaux.

Les pertes tout au long de la chaîne d'approvisionnement sont en grande partie incontournables. On observe d'ailleurs qu'elles ont à peu près la même importance dans toutes les régions du monde (Figure 25). Il faut toutefois noter qu'elles sont particulièrement faibles en Asie du Sud-Est.

Une analyse plus détaillée montre qu'en réalité la chaîne d'approvisionnement est généralement plus efficace dans les pays développés.

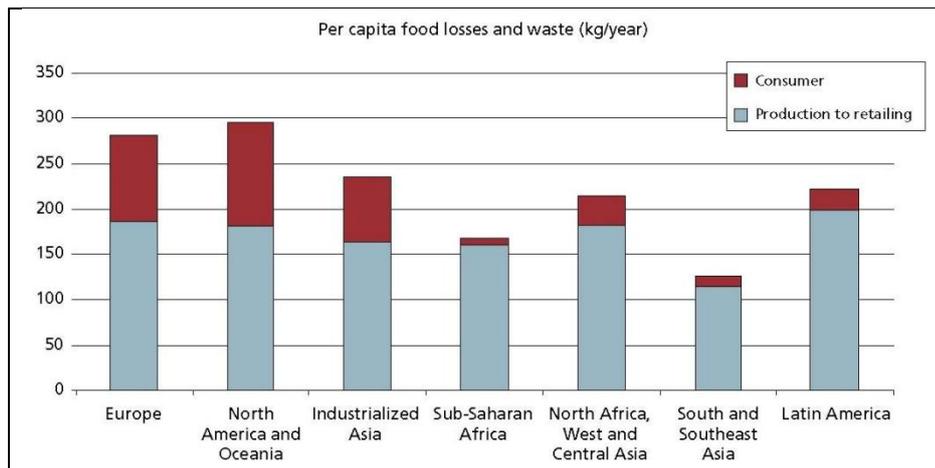


Figure 25. Pertes le long de la chaîne alimentaire (*food losses*) et chez les détaillants et les particuliers (*food wastes*) dans différentes régions du monde ([140] p. 5). North America and Oceania: Australia, Canada, New Zealand, USA; Industrialized Asia: China, Japan, South Korea.

En revanche la quantité de déchets alimentaires est très variable. Elle dépend beaucoup du PIB par habitant (Figure 26).

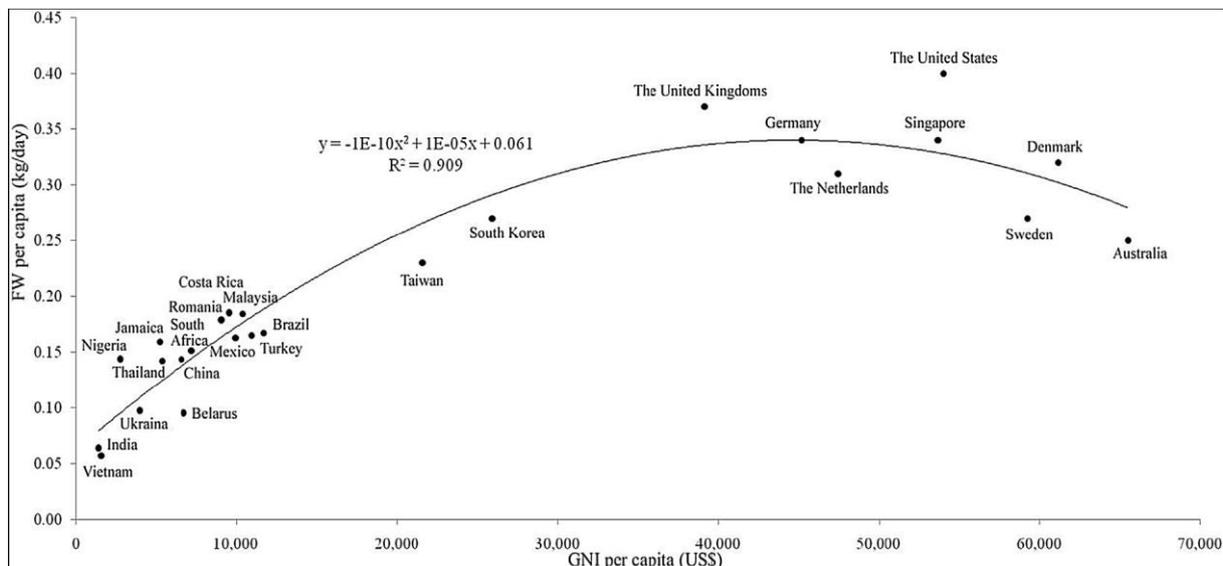


Figure 26. Relation entre le PIB par habitant et la quantité de nourriture allant dans les déchets en kg par habitant et par jour ([95]).

Il faut noter que les déchets alimentaires sont en partie inévitables (ex : épluchures, os, arêtes). Sauf bien sûr si on ne consomme que des plats préparés, les déchets étant alors constitués principalement d’emballages (c’est le cas par exemple avec les boîtes à pizzas dans les foyers de jeunes travailleurs).

([95], [140] p. 2)

Que disent l’Union européenne et la loi française au sujet des biodéchets ?

L’Union européenne encourage le compostage et la gazéification des déchets biodégradables ainsi que leur recyclage. Elle admet la valorisation énergétique dans des installations conformes aux normes. Elle incite à recourir le moins possible aux décharges (pas plus de 10 % des déchets municipaux devrait aller à la décharge en 2030).

La France est-elle le premier pays à se doter d'une loi contre le gaspillage alimentaire. Les actions sont mises en œuvre dans l'ordre de priorité suivant :

1. La prévention du gaspillage alimentaire.
2. L'utilisation des invendus propres à la consommation humaine, par le don ou la transformation.
3. La valorisation destinée à l'alimentation animale.
4. L'utilisation à des fins de compost pour l'agriculture ou la valorisation énergétique, notamment par méthanisation.

([65] p. 13, [125], [135])

Quels déchets peuvent être convertis en énergie ?

Tous les matériaux riches en carbone peuvent brûler, c'est le cas des biodéchets, du papier, du carton, du bois, des textiles et du plastique. Ils constituent les *combustibles solides de récupération* de la littérature technique (*Solid Recovered Fuels* en anglais).

Les déchets combustibles représentent plus de 80 % du poids des déchets municipaux (cf. les questions *Quelle est la composition des déchets municipaux ?* et *Que sait-on de la production de déchets dans le tiers-monde ?*). En revanche seuls les biodéchets sont rapidement dégradés par les micro-organismes. Ce sont les seuls utilisables avec les procédés biologiques.

Il faut noter que les déchets combustibles sont dans la plupart des cas potentiellement recyclables.

([7] p. 13, pp. 483-484, [13] p. 15, [14], [37], [125])

Où en est-on dans le monde pour la valorisation énergétique des déchets ?

La valorisation énergétique des biodéchets est particulièrement développée dans l'Union européenne, elle y est en moyenne de 240 kWh par personne et par an (Figure 27). Il s'agit malgré tout d'une source d'énergie marginale : un ménage consomme 2 500 kWh par an rien qu'avec l'électroménager.

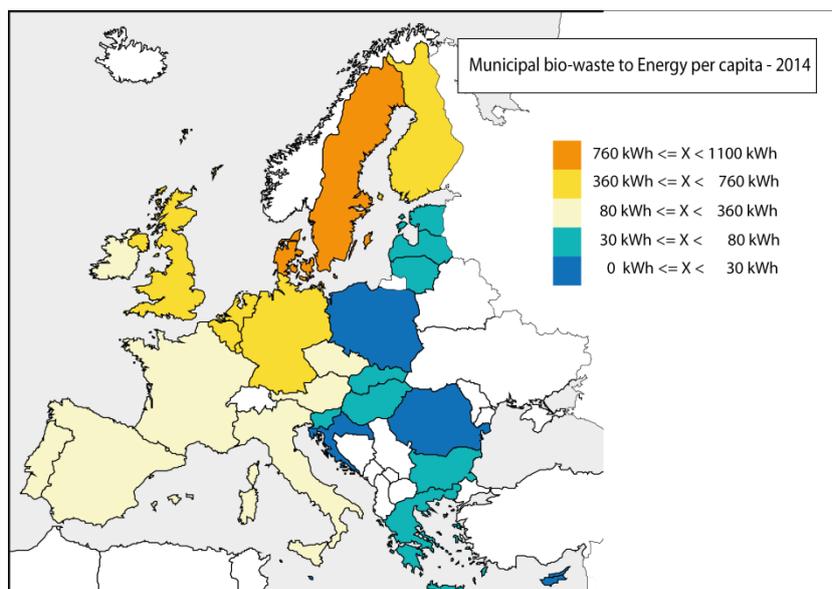


Figure 27. Production d'énergie à partir des biodéchets contenus dans les déchets municipaux par habitant et par an dans l'Europe des 28 ([142] p. 47, p. 59). L'énergie thermique et l'énergie électrique tirées des biodéchets sont additionnées et exprimées en kWh.

Le Tableau 8 montre que la production d'électricité à partir des déchets municipaux n'est notable que dans quatre pays en dehors de l'Europe (il s'agit de l'Europe au sens large : tous les pays de l'Islande à la Turquie). Elle est négligeable ou nulle ailleurs.

	Europe	USA	Japan	South Korea	Canada
kWh per capita	73,1	54,8	47,2	6,2	4,7

Tableau 8. Production d'électricité à partir des déchets municipaux en kWh par habitant et par an ([58]).

En Chine, le nombre de décharges exploitant le biogaz pour produire de l'électricité augmente de 35 % par an depuis 2007 et le nombre d'incinérateurs de 14 % (Figure 28). Le plus gros incinérateur chinois est à Beijing, il a une capacité de 3 000 tonnes par jour (l'incinérateur desservant Paris et une partie de la banlieue a une capacité de 1 900 tonnes par jour). La production d'électricité reste cependant négligeable à l'échelle de la Chine.

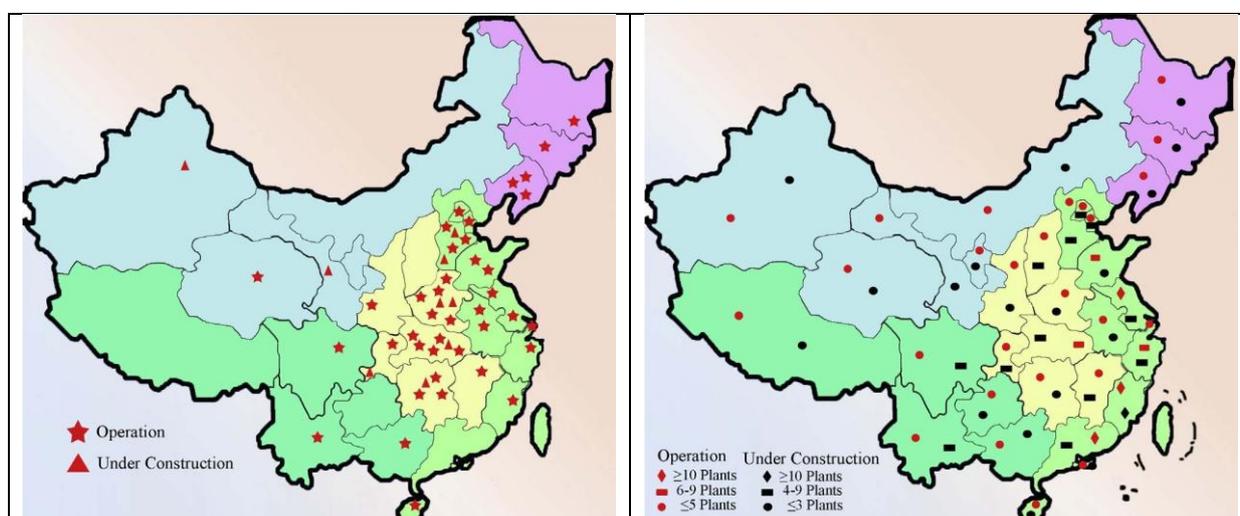


Figure 28. A gauche : répartition des décharges exploitant le biogaz pour produire de l'électricité en Chine. A droite : répartition des incinérateurs de déchets municipaux existants ou en construction ([66]).

Plus des deux-tiers des incinérateurs sont installés dans la région du Yangtze et du Pearl River Delta, les autres sont localisés dans les capitales provinciales. Les décharges sont nombreuses dans le centre et l'ouest du pays, dans des régions où la densité de population est faible.

([20], [46], [58], [66], [142] p. 47, p. 59)

Quelles sont les techniques actuelles pour convertir les déchets en énergie ?

La conversion des déchets en énergie fait appel à deux grandes classes de techniques : la thermochimie et les biotechnologies. L'énergie est récupérée sous forme d'électricité ou de vapeur d'eau sous pression ou bien sous forme de biocarburant (ex : éthanol).

Les cinq technologies les plus employées sont présentées dans le Tableau 9. Leur coût est traité dans la question *Quel est le coût du traitement des déchets municipaux ?* (la combustion directe coûte autour de 90 euros la tonne en France).

Conversion process	Aim	Conversion process conditions	Main products	By-products
Direct combustion	Maximize waste conversion into high temperature flue gases	400-540 °C	Heat, electricity	Ash
Gasification	Maximize waste conversion into high calorific fuel gases	350-1800 °C, air, oxygen or steam, 1-30 bar	Gas (CO, CH ₄ , N ₂ , H ₂ , CO ₂ (content dependent on process conditions))	Ash
Pyrolysis	Maximize thermal decomposition of solid waste into coke, gases and condensed phases	250-750 °C, absence of oxygen	Char, oil or tar, gas (CO, CH ₄ , hydrocarbons, H ₂ , CO ₂ (content dependent on process conditions))	Char (use as oil amendment, activated coal or sorbent)
Anaerobic digestion	Maximize waste conversion into high calorific fuel gases and valuable by-products	35-55 °C, anaerobic, reactor size 10-10,000 m ³	Gas (main components CH ₄ and CO ₂)	Sludge (use as fertilizer after proper treatment)
Ethanol fermentation	Maximize waste conversion into biofuels	30-35 °C, pH 4.5-6.0 anaerobic	Ethanol, CO ₂	Animal feed

Tableau 9. Caractéristiques de technologies les plus employées pour convertir des déchets municipaux en énergie ([36], [88]).

La combustion directe est de loin la méthode la plus employée dans le monde. Lorsque les déchets sont très humides, ils sont mélangés avec du charbon pour améliorer la combustion, c'est le cas par exemple en Chine. C'est une bonne solution pour les villes petites ou moyennes car elle permet d'utiliser des incinérateurs deux fois moins coûteux. En revanche, le rendement de la production d'électricité est faible car il est proportionnel à la taille des installations (20 % pour les petits incinérateurs, 30 % pour les grands, 40 % pour les centrales à charbon).

L'autre grande option est la production d'un gaz combustible. La thermochimie convertit les déchets en un gaz riche en oxyde de carbone apparenté au gaz de ville (gazéification). L'approche biochimique donne un gaz riche en méthane apparenté au gaz naturel (digestion anaérobie). La digestion anaérobie peut être réalisée de façon contrôlée dans des unités de méthanisation ou bien spontanément dans une décharge.

Dans l'Union européenne, où la valorisation énergétique des biodéchets est très développée, 77 % de l'énergie produite provient de la combustion directe et 23 % de la production de biogaz. La part de la combustion directe monte à 87 % si on tient compte de l'ensemble des déchets combustibles.

En France, un tiers de l'énergie produite par les incinérateurs est sous forme d'électricité et deux tiers sous forme d'énergie thermique. Les proportions sont inversées pour l'énergie produite par les décharges (respectivement 76 % et 24 %).

([25] pp. 7-12, [31] p. 254, [33] p. 9, [36], [53], [54] pp. 7b.7-7b.8, [66], [73], [87], [88], [97] p. 13, p. 16, [142], [144])

Que fait-on des déchets produits par la valorisation énergétique des déchets ?

La combustion des déchets municipaux produit du mâchefer (20 % du poids des déchets incinérés), des déchets métalliques (1,4 % du poids des déchets incinérés) et des cendres auxquels il faut ajouter des polluants atmosphériques dans le cas des anciens incinérateurs. L'élimination des polluants atmosphériques a fait des incinérateurs « de vraies usines à gaz », au sens propre et au sens figuré. Les polluants sont maintenant piégés dans une succession de filtres, il n'y en a quasiment plus dans l'atmosphère (Tableau 10) ; ces polluants constituent une partie des cendres (le tout représentant 3 % du poids des déchets incinérés).

Polluants en mg/Nm ³	Normes	Moyenne	Min	Max
Poussières	10,0	1,4	0,2	4,2
Acide chlorhydrique	10,0	2,1	0,8	6,3
Acide fluorhydrique	1,0	0,1	0,0	0,2
Dioxyde de soufre	50,0	9,2	0,6	25,0
Oxydes d'azote	70,0	43,5	23,0	60,0
Cadmium + thallium	0,050	0,002	0,000	0,005
Mercurure	0,050	0,006	0,000	0,023
Antimoine + arsenic + plomb + chrome + cobalt + cuivre + manganèse + nickel + vanadium	0,50	0,07	0,01	0,31
Dioxines et furanes (en ng/Nm ³)	0,100	0,007	0,001	0,016

Tableau 10. Rejets de polluants dans l'atmosphère par les incinérateurs desservant Paris et sa banlieue ([106]). Normes : normes en région parisienne ; elles sont plus strictes que les normes européennes. Min, Max : valeurs minimum et maximum observées pendant l'année 2014.

Le mâchefer est généralement utilisé comme sous-couche routière. Les déchets métalliques sont recyclés, ils sont constitués de ferrailles (92,5 %) et de non-ferreux (7,5 %).

Les cendres sont des déchets dangereux, elles concentrent la quasi-totalité de la pollution (ex : dioxine). Elles font l'objet d'une recherche très active afin de neutraliser leur toxicité. Cette recherche est dominée par le Japon (75 % des brevets publiés entre 1983 et 2013) et la Chine (11 %) (Figure 29).

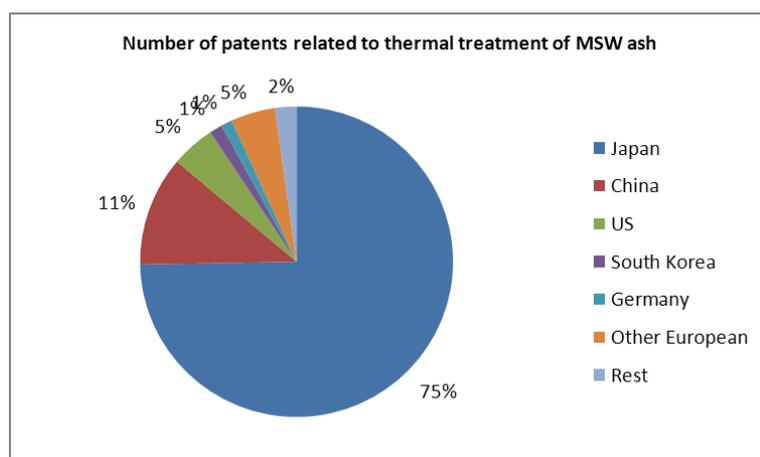


Figure 29. Nombre de brevets relatifs au traitement thermique des cendres des incinérateurs de déchets municipaux ([89]).

La solution la plus efficace est la fusion des cendres, elle coûte entre 30 à 60 dollars par tonne de déchets incinérés. Le volume des cendres est considérablement réduit et tous les polluants organiques sont détruits. Elle est très utilisée au Japon (plus de 200 usines retraitaient les cendres de cette façon en 2015). Les autres pays envoient les cendres dans des cimenteries, cette solution étant dix fois moins chère. Les polluants organiques (ex : dioxine) sont détruits par la chaleur (1 450° C) et les métaux lourds sont piégés dans le ciment.

([16] p. 29, [72], [89], [97] pp. 12-13, [106])

Peut-on produire un compost de qualité avec les déchets municipaux ?

Les biodéchets sont décomposés par de très nombreux micro-organismes. En présence d'une quantité suffisante d'oxygène, les biodéchets sont transformés en compost. L'aération et le pourcentage d'humidité sont faciles à maîtriser dans des installations industrielles, le vrai problème

est ailleurs : il est indispensable en amont d'éviter tout mélange entre les biodéchets et le reste des ordures ménagères. Autrement le compost est pollué par des débris de plastique, de verres et de métaux, il n'est plus utilisable. Faute d'avoir pu résoudre ce problème, la Chine a renoncé depuis 2011 à produire du compost à partir des déchets municipaux.

Le traitement mécano-biologique (TMB) est en théorie une solution. Les tris mécaniques permettent de récupérer les matières recyclables et d'extraire les éléments qui pollueraient le compost (cf. la question *Le tri mécanisé des déchets recyclables fonctionne-t-il de façon satisfaisante ?*). Le traitement biologique combiné assure la production du compost. L'expérience montre que le TMB ne permet pas d'obtenir de façon reproductible un compost conforme à la réglementation de beaucoup de pays européens (Figure 30). Aussi l'ADEME recommande-t-elle d'éviter cette technique.

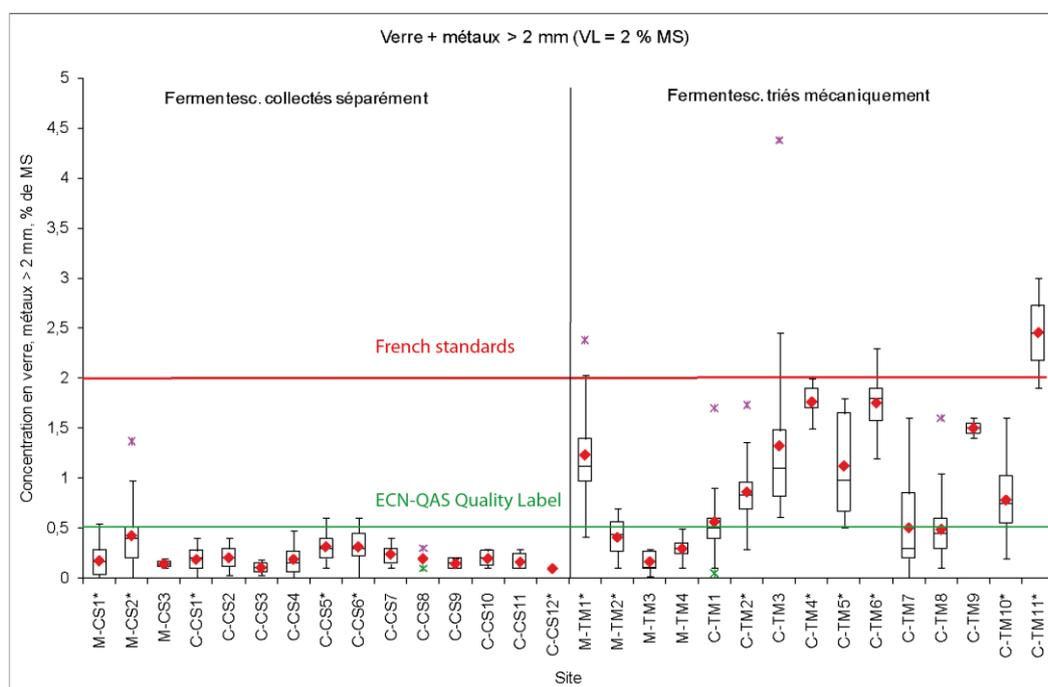


Figure 30. Comparaison des teneurs en indésirables verre et métaux de taille supérieure à 2 mm. A gauche : composts réalisés avec un tri à la source des biodéchets. A droite : composts réalisés par traitement mécano-biologique des déchets municipaux (TMB) ([35] p. 83). La valeur limite est de 2 % en France (ligne rouge) et de 0,5 % dans beaucoup de pays européens (ligne verte) ([81]).

La meilleure solution est le tri des biodéchets par les particuliers. Elle est obligatoire dans six Etats membres et trois régions de l'Union européenne.

Une bonne alternative est une collecte limitée à la restauration collective car le tri y est facile à organiser. Les cantines peuvent aussi être équipées pour produire le compost sur place. On rencontre de tels dispositifs dans plusieurs pays européens. Ils sont conçus pour des établissements produisant de cinq cents à mille repas par jour.

([16] p. 27, [18], [31] pp. 197-232, [35] p. 83, [66], [81], [94], [121] pp. 58-59, pp. 69-70)

Le recyclage

Le tri des déchets – combien de poubelles ?

Le tri à la source simplifie la gestion des déchets en aval et en augmente l'efficacité. L'effort demandé aux ménages dépend des pays, même au sein de l'Union européenne. Cela va de points de collecte pour les déchets recyclables (ex : Croatie, Espagne, Pologne, Portugal, Slovaquie) à six poubelles individuelles (ex : Pays-Bas) (Tableau 11).

Collection type		Paper Cardboard	Glass	Plastic	Metal	Bio-waste
	Door-to-door (single fraction)	AT, BE, BG, CY, DE, DK, FI, HU, IT, LU, LV, NL, SI, UK	BG, FI, LU, LV, NL, SI, MT	AT, LV, NL, DK	FI, NL, DK	AT, BE, CZ, DE, FI, EE, IT, HU, LU, NL, SI, SE, IE, UK
	Co-mingled Plastic + metal			BE, BG, CY, DE, FR, IT, HU, LU, SI		
	Co-mingled Paper + plastic + metal	RO, MT		RO, MT		
	Co-mingled Glass + plastic + metal		UK			
	Co-mingled Paper + glass + plastic + metal	EL, IE				
	Bring points	CZ, EE, ES, FR, HR, LT, PT, PL, SE, SK	AT, BE, DK, CY, CZ, DE, EE, ES, FR, HR, IT, HU, LT, PT, PL, RO, SE, SK	SE	AT, EE, SE	ES
	Civic amenity sites	Primary collection: CZ (metal waste), SK (metal and bio-waste), LV (metal) Addition collection of all waste streams: all countries PL: rare distribution of civic amenity sites				

Tableau 11. Les types les plus fréquents de collecte des déchets recyclables dans les Etats membres de l'Europe des 28 ([121] p. 12). Cf. Tableau 1 pour l'abréviation des noms de pays.

Il n'existe pas de législation fédérale sur le recyclage aux Etats-Unis. Un peu plus de la moitié des Américains ont accès à une collecte des déchets recyclables. La décentralisation est extrême : il y a 9 000 programmes de collecte sélective pour les matériaux d'emballage et le papier-carton.

Au Japon, le tri repose sur l'utilisation d'une poubelle par type de déchets recyclables. Certaines communes y ajoute un tri pour le non-recyclable : d'un côté les déchets combustibles et de l'autre les non-combustibles.

Une organisation institutionnelle de la collecte des déchets recyclables n'existe pratiquement que dans les pays riches. Elle fait l'objet d'une économie informelle à peu près partout ailleurs. Il y a des exceptions, par exemple :

- il y a un sac poubelle pour chaque type de recyclables et un pour les déchets alimentaires en Corée du Sud.

- il y a une poubelle pour l'ensemble des déchets recyclables (métal, papier-carton, plastique, verre) à Singapour.

([22] pp. 8-9, pp. 14-18, [50], [64] pp. 24-27, [74], [80], [94], [121] p. 12, pp. 68-75)

Le tri mécanisé des déchets recyclables fonctionne-t-il de façon satisfaisante ?

Le Tableau 12 montre les taux de récupération dans le cas d'une installation de tri mécanisé à la pointe du progrès alimentée avec tous les déchets recyclables mélangés (métal, papier-carton, plastique, verre). L'efficacité du tri peut être évaluée de deux façons : la quantité totale de matière commercialisable (*Total compatible*) ou bien la quantité de matière ayant gardé presque toutes les qualités du produit initial (*Intended product*), cette dernière se vendant bien sûr plus chère. En effet, une partie de la matière récupérée doit être déclassée car elle n'est pas assez pure ou elle est en partie dégradée (c'est souvent le cas du papier-carton par exemple).

Product	Intended product		Total compatible	MBT
	purity	wt.-%	wt.-%	wt.-%
Cardboard	92.3	84.6	86.2	12 {0 – 39}
News & pams	92.0	49.9	99.6	
Mixed paper	95.0	77.9	96.7	
Aluminium cans	97.6	87.5	87.5	62 {33 – 95}
Aluminium foil	100.0	30.0	70.0	
Steel cans	96.7	96.0	96.0	61 {35 – 84}
Glass	98.9	98.6	98.6	13 {5 – 49}
Beverage cartons	97.5	31.1	90.0	56 {10 – 71}
Natural HDPE bottles	91.2	91.3	93.5	14 {1 – 36}
Coloured HDPE bottles	91.7	60.7	74.6	
Clear PET bottles	91.0	86.9	94.0	29 {5 – 48}
Coloured PET bottles	94.8	62.2	82.0	
Total sorting residues (wt.-%)	5.54			

Tableau 12. Les trois premières colonnes donnent les taux de récupération des déchets recyclables et la pureté des matériaux dans le cas d'un tri mécanique alimenté avec les déchets recyclables mélangés ([94]).

La colonne de droite donne les taux de récupération avec un traitement mécano-biologique (MBT) des déchets municipaux ([49], [94]). Les chiffres entre accolades correspondent aux minima et maxima observés dans huit installations en Espagne.

Intended product : matériaux presque identiques au produit originel. **Total compatible** : Intended product + matériaux déclassés. **News & pams** : journaux et magazines. **Total sorting residues** : matériaux qui n'ont pas été recyclés d'une façon ou d'une autre.

PET : polyéthylène téréphtalate. **HDPE** : polyéthylène haute densité.

Il y a aussi le cas où les déchets recyclables sont mélangés avec les autres déchets municipaux. Il faut alors commencer par les extraire en faisant appel au traitement mécano-biologique (TMB) – c'est d'ailleurs la seule utilisation du TMB aux Etats-Unis. On se retrouve ensuite dans une situation comparable au cas ci-dessus, sauf pour le papier-carton car il est abîmé par l'humidité. Le Tableau 12 montre que le taux de récupération final est beaucoup plus faible qu'avec un tri à la source.

([49], [94])

Comment fonctionne l'économie du recyclage en Chine ?

Le recyclage des déchets fait traditionnellement l'objet d'une économie informelle en Chine. Les habitants mettent de côté tout ce qui est recyclable pour le vendre à des chiffonniers qui font du porte-à-porte (Figure 31). Les spécialistes estiment que cela représente entre 17 et 33 % du poids total des déchets. Bien que beaucoup de municipalité soient équipées pour trier les déchets, le

rendement de la collecte institutionnelle est très faible car il ne reste pratiquement rien de recyclable dans les déchets municipaux.

Les spécialistes estiment que de 3,3 à 5,6 millions de personnes travaillent dans cette économie informelle.



Figure 31. L'économie parallèle du recyclage à Shanghai (© Gucki Riva 2013).

Les chiffonniers sont à la base d'une pyramide de métiers qui va jusqu'aux industries manufacturières en passant par un réseau de petites boutiques et de « marchés du recyclage » (Tableau 13).

Highest value  Lowest value	Manufacturing industries
	Brokers, wholesalers and other processors
	Craftsmen, middlemen
	Recycling MSEs and scavenger co-operatives
	Family type units involved in waste collection or scavenging/picking
	Individual waste scavengers/pickers

Tableau 13. Organisation hiérarchique de l'économie informelle de la collecte des déchets recyclables ([8]).

L'économie informelle du recyclage est confrontée à la concurrence des matières recyclables importées d'Europe. La production de ces dernières étant très fortement subventionnée, elles sont vendues moins chères en Chine que celles des chiffonniers. Face à ce problème, les chiffonniers ont tendance à privilégier maintenant le recyclage des DEEE. Résultat, l'efficacité du recyclage des déchets municipaux baisse.

Il n'existe pas de coordination entre l'économie informelle du recyclage et les politiques municipales en matière de déchets.

([4] p. 25, p. 102, [8], [22] pp. 14-18, [23] p. 116, [26] pp. 10-11, [50], [90])

Combien rapporte le recyclage des déchets d'emballages ?

Il n'y a pas de réponse exacte car le marché des matériaux recyclés est très fluctuant. Il est cependant clair que la rentabilité augmente avec la taille des centres de tri et l'automatisation de leur fonctionnement (Figure 32). Un point clé est la capacité de trier correctement les différents types de plastique : 1) les revenus augmentent ; 2) le volume des déchets à éliminer diminue d'autant.

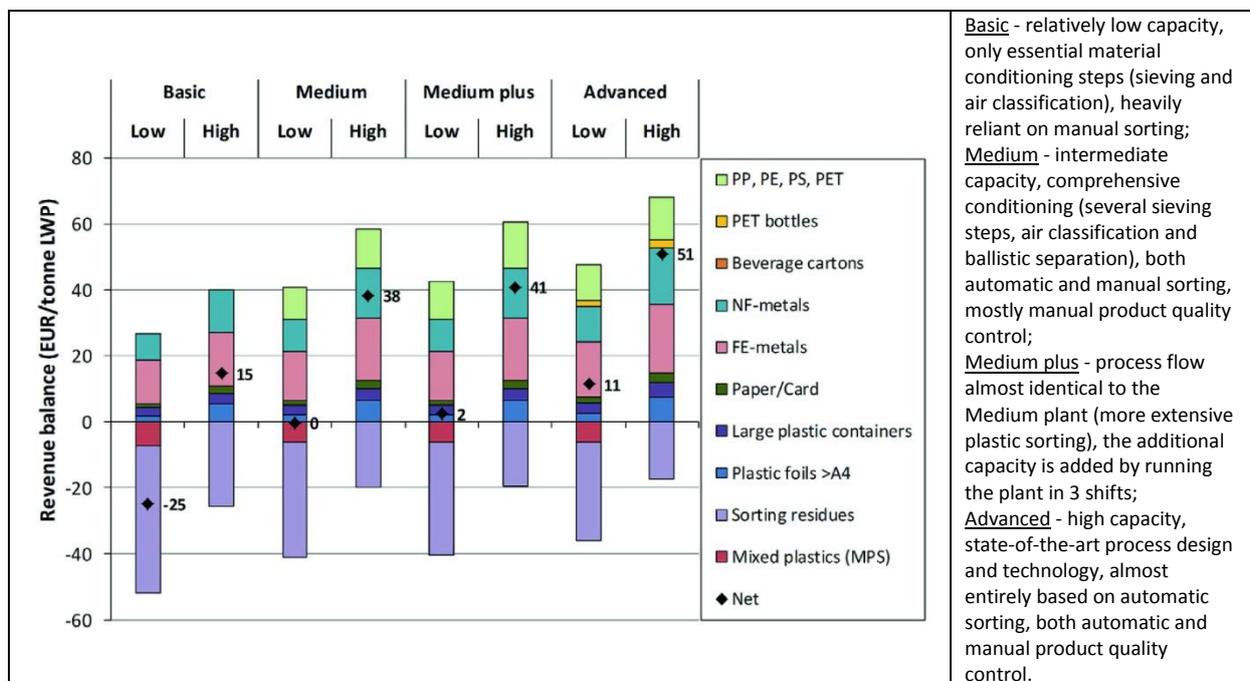


Figure 32. Revenus du recyclage des déchets d'emballages en Allemagne en fonction du type de centres de tri. Les valeurs négatives représentent les coûts d'élimination tandis que les valeurs positives indiquent les recettes des ventes de matériaux ([116]). Le losange indique le revenu final en euros par tonne de déchets d'emballages.

Les petites installations (25 000 tonnes de déchets d'emballages par an) ne couvrent généralement pas leurs frais. Les installations moyennes (de 50 000 à 75 000 tonnes par an) gagnent de l'argent quand le cours des matériaux recyclés est suffisamment haut. Les installations les plus automatisées (100 000 tonnes par an) sont toujours bénéficiaires.

Sous réserve d'un accord des pouvoirs publics, les matériaux issus du recyclage perdent leur statut de déchet pour devenir des matières premières de recyclage.

([113], [116])

Qui finance la collecte et le recyclage des déchets ?

En Europe, une partie de la collecte, du recyclage ou du traitement des déchets municipaux est pris en charge par la *Responsabilité élargie des producteurs* (REP). Le principe de la REP consiste, pour l'essentiel, à faire supporter par les producteurs une responsabilité significative pour la gestion des déchets issus des produits qu'ils ont mis sur le marché, notamment les coûts liés au recyclage. Les éco-organismes assurent la gestion financière ou organisationnelle de ce dispositif par grandes filières (emballages, verre, etc.). La Figure 33 donne la liste des filières en France.

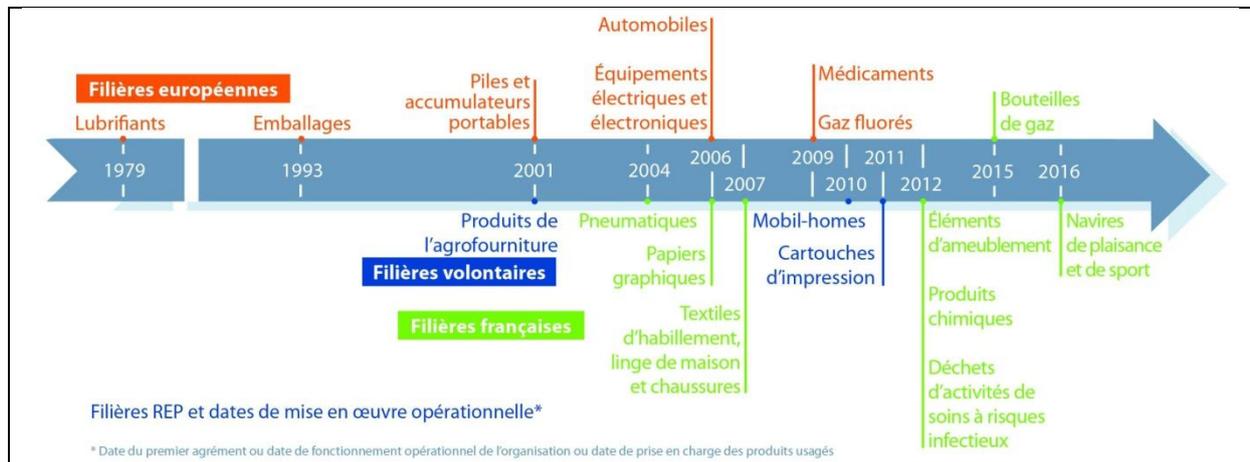


Figure 33. Les filières à responsabilité élargie du producteur ([130] p. 4).

Le coût pour les producteurs varie considérablement selon les Etats membres (ex : de 8 euros la tonne de papier-carton en Roumanie à 163 en France ou bien de 21 euros la tonne de plastique en Finlande à 1 300 euros en Allemagne). Il est difficile de savoir s'il couvre les frais car il existe une ambiguïté sur ce qui est à la charge des producteurs. Il semble toutefois que les producteurs payent intégralement la collecte et le recyclage des déchets d'emballages en Allemagne, en Autriche et en Belgique. C'est beaucoup moins clair ailleurs.

La REP n'existe pas qu'en Europe. L'OCDE a publié en 2001 le document *Responsabilité élargie du producteur – Manuel à l'intention des pouvoirs publics* incitant les membres de l'organisation à mettre en place la REP. Avec un succès limité. La REP est très peu utilisée aux Etats-Unis. Elle n'y porte pratiquement que sur les DEEE et encore, dans la moitié seulement des Etats. Elle est en revanche utilisée en Australie, au Canada, en Corée du Sud, au Japon ainsi que dans des pays qui ne sont pas membres de l'OCDE.

La Chine a adopté la REP pour les DEEE. Leur collecte et leur recyclage sont financés par une taxe payée par les producteurs chinois et les importateurs.

([34] pp. 105-112, [41], [51], [56], [62] p. 108, [67], [69], [79], [80], [119] pp. 160-165, [130] pp. 3-5)

Quel rôle jouent les déchets municipaux dans la production de matières premières issues du recyclage ?

Le tri à la source des déchets municipaux est très important pour l'industrie du verre, il lui fournit quasiment tout le verre recyclé (Tableau 14). Il fournit aussi plus d'un quart du plastique récupéré pour le recyclage bien qu'il ne collecte que 5 % du plastique utilisé. L'écart est moindre dans le cas du papier-carton. Le tri à la source des déchets municipaux fournit 9 % du papier-carton recyclé et collecte 7 % du papier-carton utilisé.

Product	Municipal Collections / National Consumption	Municipal Collections / (all recycled waste)
Glass	40,8%	84,3%
Plastics	5,1%	26,7%
Paper & Paperboard	7,3%	9,2%
Steel	0,7%	0,8%
Aluminium	0,6%	0,9%

Tableau 14. A gauche : quantité des déchets municipaux récupérés grâce au tri à la source par rapport à la consommation de matières premières en France en 2013 (en poids). A droite : quantité de déchets municipaux recyclés par rapport à l'ensemble du recyclage en France en 2013 ([85], [108]).

En revanche, le tri à la source des déchets municipaux ne joue qu'un rôle tout à fait marginal dans le recyclage des métaux. Les deux-tiers des ferrailles proviennent des chutes des industries métallurgiques et le reste du secteur du bâtiment, des véhicules hors d'usage et des DEEE.

Le traitement des DEEE permet de récupérer 1,4 % de l'acier utilisé en France, soit deux fois plus que le tri à la source des déchets municipaux. D'une façon plus générale, 80 % du tonnage des DEEE se retrouvent à l'état de matières premières issues du recyclage.

([85], [108], [119] pp. 80-88, [141] p. 117)

Pourquoi les DEEE sont-ils un cas à part ?

Les DEEE contiennent des substances toxiques ou dangereuses pour l'environnement et une forte proportion de matériaux recyclables de grande valeur (Tableau 15).

Materials	Gold	Copper	Palladium	Plastics	Silver	Aluminium	Tin	Barium	Platinum	Cobalt
% Revenues	50.4	13.9	9.5	9.2	3.6	2.5	2.0	1.8	1.7	1.6

Tableau 15. La part jouée par les principaux composants des DEEE dans la valeur des déchets recyclés ([107]).

Aussi leur collecte et leur recyclage font-ils l'objet d'une réglementation spécifique pratiquement partout dans le monde (cf. la référence [44] pour une présentation des législations nationales). Il faut noter toutefois que la liste des objets faisant partie des DEEE n'est pas la même dans tous les pays.

La politique de l'Union européenne en matière de DEEE est fixée par la Directive 2012/19/UE. Elle indique notamment les objectifs à atteindre pour la collecte et le recyclage.

En 2014, la production de DEEE était de l'ordre de 22 kg par habitant et par an aux Etats-Unis, de 20 kg en Europe et de 4,4 kg en Chine (cf. la Figure 1 pour la composition des DEEE).

([39], [44], [74] p. 18, [107], [119] p. 96, [141] p. 41, [147])

Quelle est la politique chinoise en matière de DEEE ?

La situation a beaucoup évolué en Chine depuis le début des années 1980 :

- jusqu'en 2000. Le traitement des DEEE est le fait d'une économie informelle fortement polluante basée sur le démantèlement manuel. Cette économie peut avoir localement un poids très important.
- 2001-2008. Les pouvoirs publics lancent des expériences pilotes de recyclage dans les principales villes chinoises. Les principaux fabricants de téléphones mobiles et d'ordinateurs créent des points de collecte. Malgré tout, le secteur informel capte encore l'essentiel du marché des DEEE : 20 millions de tonnes de DEEE ont été recyclés en 2004 dans la ville de Guiyu (province de Guangdong) et ont rapporté 110 millions d'euros.

- 2009-2020. Un réseau officiel de collecte et de recyclage est mis en œuvre graduellement sous le contrôle des gouvernements provinciaux. Il est financé par une taxe payée par les producteurs chinois et les importateurs. Les consommateurs sont tenus de porter leurs DEEE à un point de collecte de ce réseau.

Il est important de noter que la politique officielle en matière de DEEE ne fait aucune allusion à l'économie informelle et que la mise en œuvre de cette politique est éclatée entre plusieurs ministères et de nombreux services.

Pourtant, la majeure partie des DEEE échappe jusqu'ici au réseau officiel de collecte, les habitants préférant les chiffonniers traditionnels (la répartition était un quart / trois-quarts en 2013 à Shanghai). Il faut dire que le service rendu n'est pas comparable. Les chiffonniers passent à domicile et achètent les DEEE alors qu'il faut apporter les DEEE au point de collecte officiel et que celui-ci ne les paye pas. D'ailleurs, les usines de recyclages agréées par les pouvoirs publics se fournissent principalement chez les chiffonniers.

([21], [24], [41], [67], [103], [104], [114], [122])

Quelle est l'importance de la R&D dans l'industrie du recyclage ?

L'industrie du recyclage doit s'adapter sans cesse à l'apparition de nouveaux produits (les écrans plats ont remplacé les tubes cathodiques...). Les industriels doivent relever deux défis : 1) extraire le maximum de matière des déchets à recycler ; 2) obtenir des matières premières aussi pures que les « vraies » pour pouvoir les concurrencer.

Le recyclage des téléphones mobiles illustre bien les besoins en R&D. Un téléphone mobile est un assemblage très complexe d'une quarante de matériaux, certains ayant une forte valeur (ex : or, cuivre), d'autres étant toxiques (ex : certains métaux, certains plastiques notamment ceux contenant des retardateurs de flamme bromés).

Près de la moitié de la R&D se fait en Asie et 28 % en Europe, en revanche les Etats-Unis sont pratiquement absents dans ce domaine (Figure 34 A).

Même si la R&D ne néglige pas les aspects humains (ex : protection des travailleurs, comportement du public, *business model* du recyclage), l'essentiel de l'effort porte sur la conception des appareils (l'éco-conception) et sur la physico-chimie (Figure 34 A). De très nombreuses techniques sont testées pour l'extraction et la purification des matériaux (Figure 34 B).

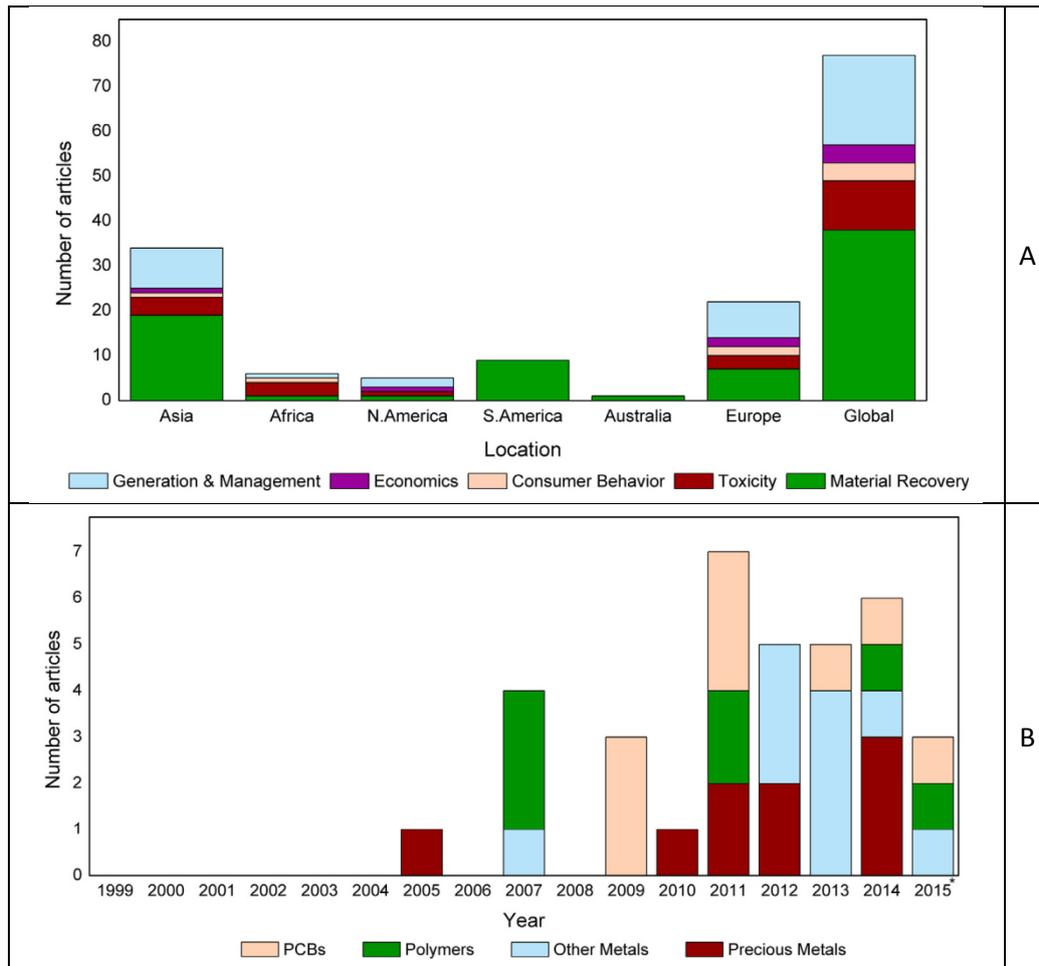


Figure 34. La R&D sur le recyclage des téléphones mobiles ([117]).

De nombreuses technologies sont expérimentées pour l'extraction et la purification des métaux contenus dans les DEEE (Tableau 16). Aucune ne résout à elle-seule tous les problèmes car les DEEE sont des objets complexes. Certaines combinaisons de technologies semblent malgré tout prometteuses, comme par exemple un prétraitement mécano-chimique suivi d'une purification par hydrométallurgie.

Recycling technology	State of recovery metals	Species and effect of recovery metals	Advantages of environmental and technological aspect	Disadvantages of environmental and technological aspect
Pyrometallurgical technology	Pure solid metals	Almost all metals; high recovery rate	Totally-commercial; owing some dust chamber and exhaust gas treatment plant	Vast cost of investment; fine particles pollution; consuming a vast number of energy; difficult to recovery of precious metals
Mild extracting technology	Solution	Almost all metals; recovery rate related to the reagents and reaction condition	Low toxicity; simple and easy accessibility; relative low environment damage	High cost of some reagent; some reagents could result in waste water pollution; semi-commercial
Biometallurgical technology	Solution	Only for a few specific metals; considerable recovery rate for Cu, Zn, Au, et	Environment-friendly; low cost of investment	High selectivity of metals (only for a few specific metals, such as Cu, Zn, Au); no industrialization
Electrochemical technology	Pure solid metals	Only for specific metals; high recovery rate	High recovery efficiency; low cost of investment; mature	Waste water and residue pollution; low industrialization;

Recycling technology	State of recovery metals	Species and effect of recovery metals	Advantages of environmental and technological aspect	Disadvantages of environmental and technological aspect
Supercritical technology	Solid mixture of metals	Almost all metals; high recovery rate	High recovery efficiency; low cost of investment; low environment damage	Failure to recycle single metal; waste oil and waste gas pollution; low industrialization
Vacuum metallurgical technology	Solid single metal	Only for high vapour pressure metals; high recovery rate	Environment-friendly; short technological process	Relative high cost of investment; low industrialization; immature technology
Other metallurgical technologies (ultrasonical, mechanochemical technology, etc.)	Solid mixture of metals/solution	Need to combined with other technologies to recycle metals	Environment-friendly; low cost of investment	Failure to recycle single metal; no industrialization

Tableau 16. Etat de l'art des technologies de recyclage des métaux contenus dans les DEEE ([145]).

([31] pp. 131-165, [94], [117], [145])

Quelle est l'importance du commerce international des déchets ?

L'exemple de l'Europe des 28 montre que les échanges de déchets recyclables se font principalement entre pays voisins mais que la part du commerce international augmente d'année en année (Figure 35).

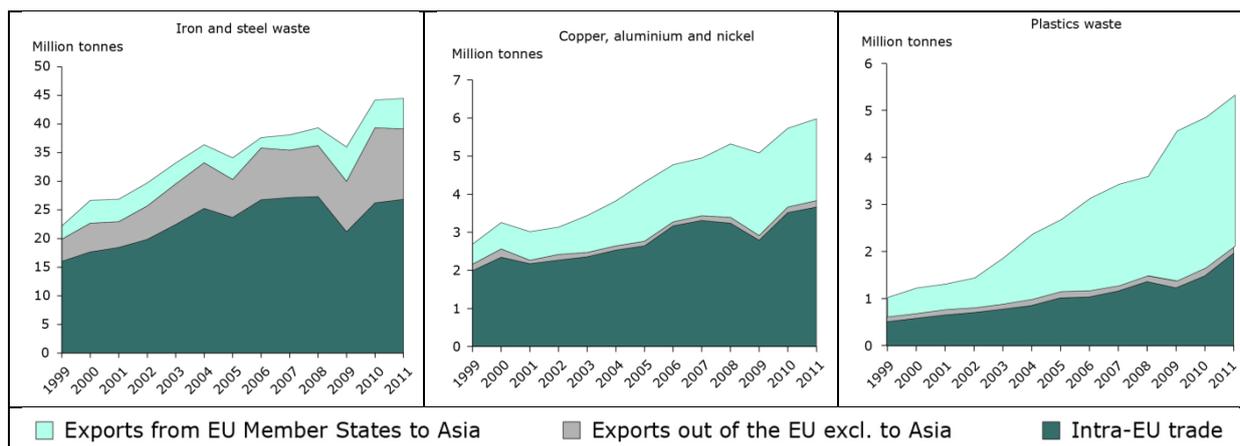


Figure 35. Principales exportations de déchets destinés au recyclage ([40] p. 21). La Turquie est le premier importateur mondial de ferrailles de fer-acier.

La Chine est le premier importateur mondial de déchets de plastiques, de déchets de papier-carton et de déchets de métaux non-ferreux. La Turquie est le premier importateur mondial de déchets ferreux, la Chine est septième. Le premier exportateur mondial de déchets recyclables est l'Union européenne, sauf pour le papier-carton où c'est les Etats-Unis.

La situation est plus complexe pour les DEEE car la réglementation de l'import et de l'export dépend des pays (Figure 36). En réalité toute cette législation est très théorique puisqu'Interpol estime que 90 % des échanges internationaux de DEEE sont illicites, ce qui représente un marché de 13 à 19 milliards de dollars.

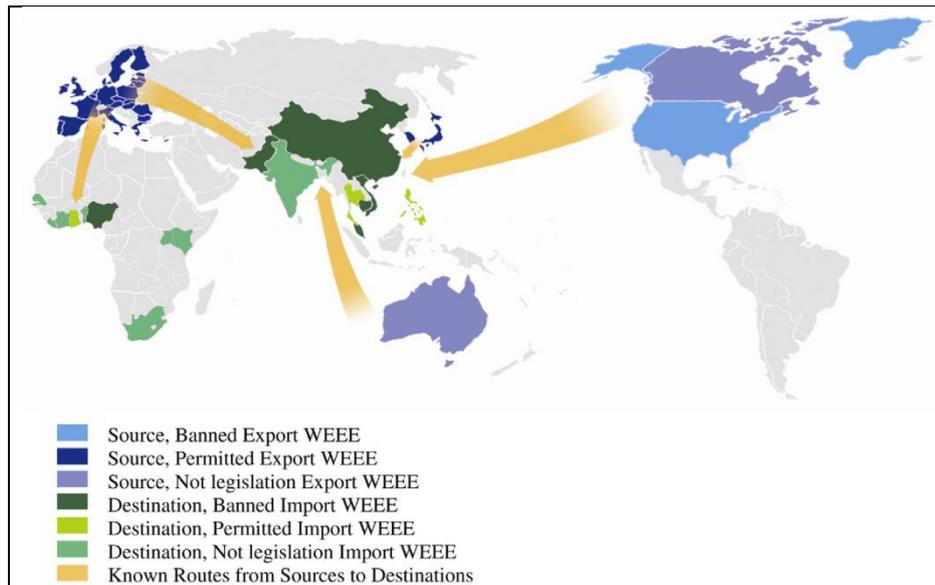


Figure 36. Commerce international des DEEE et législations nationales correspondantes ([44]).

Le droit international prend comme principe qu'un pays ne peut pas se débarrasser de ses déchets en les envoyant ailleurs. D'un autre côté, le recyclage n'a de sens que si les matières premières issues du recyclage sont effectivement utilisées, ce qui implique un transport des déchets triés jusqu'au lieu d'utilisation. Les mouvements transfrontaliers des déchets font donc l'objet d'un contrôle douanier pour vérifier qu'il s'agit bien de recyclage.

Les fraudes sont nombreuses dans tous les pays. Les exportations américaines de déchets de plastique à recycler ont chuté en 2013 quand la Chine a renforcé son contrôle douanier (*Operation Green Fence*).

Pire, une partie du marché est sous l'emprise d'organisations criminelles.

([40] pp. 9-10, p. 21, [44], [52], [78], [101], [102], [102], [109], [119] pp. 80-88, [131], [134])

Références

Les références sont classées par date de mise en ligne. Les URL ont été vérifiées en avril 2016. En cas de problème, il est généralement possible de récupérer le document avec un moteur de recherche en faisant une requête avec le titre.

- [1] Directive 94/62/CE du Parlement européen et du Conseil du 20 décembre 1994 relative aux emballages et aux déchets d'emballages. European Commission. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=URISERV%3A121207#amendingact> (20/12/1994)
- [2] Les déchets : un problème ou une ressource ? European Environment Agency. <http://www.eea.europa.eu/fr/signaux/signaux-2014/articles/les-dechets-un-probleme-ou> (01/10/2004)
- [3] Theng Lee Chong, Yasushi Matsufuji, Mohd Nasir Hassan. Implementation of the semi-aerobic landfill system (Fukuoka method) in developing countries: A Malaysia cost analysis. *Waste Management* **25** (2005) 702-711. doi:10.1016/j.wasman.2005.01.008 (16/04/2005)
- [4] Waste management in China: issues and recommendations. The World Bank. http://www-wds.worldbank.org/external/default/WDSContentServer/WDSP/IB/2006/03/23/000160016_20060323131109/Rendered/PDF/332100CHAOWaste1Management01PUBLC1.pdf (01/05/2005)
- [5] A Policy Framework for the Management of Municipal Solid Waste (2005-2014). Hong Kong Environmental Protection Agency. http://www.epd.gov.hk/epd/msw/html_en/content.htm (19/11/2005)
- [6] Solid Waste Management (Volume II: Regional Overviews and Information Sources). United Nations Environment Programme. http://www.unep.org/ietc/Portals/136/SWM_Vol-II.pdf (12/01/2006)
- [7] Alain Damien. *Guide du traitement des déchets*. L'Usine nouvelle - Dunod éditeurs. ISBN 2-10-049597-6 (01/06/2006)
- [8] David C. Wilson, Costas Velis, Chris Cheeseman. Role of informal sector recycling in waste management in developing countries. *Habitat International* **30** (2006) 797-8. doi:10.1016/j.habitatint.2005.09.005 (13/7/2006)
- [9] Politique de l'UE en matière de déchets : Historique de la stratégie. European Commission. http://ec.europa.eu/environment/waste/pdf/story_book_fr.pdf (28/11/2006)
- [10] Provisionnement des coûts de post-exploitation des installations de stockage de déchets non dangereux. ADEME. http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/49033_provisionnement_couts_postexploitation.pdf (22/11/2007)
- [11] Implementing integrated solid waste management systems in India : moving towards the regional approach. The World Bank. http://www-wds.worldbank.org/external/default/WDSContentServer/WDSP/IB/2008/11/14/000334955_20081114044646/Rendered/PDF/464270WSP0Box31PUBLIC11SWM1dec12007.pdf (01/12/2007)

- [12] Plastic bags set to be banned. *Shanghai Daily*.
<http://www.china.org.cn/english/environment/238881.htm> (09/01/2008)
- [13] Alain Damien. *La biomasse énergie - Définition, ressources, usages*. L'Usine nouvelle - Dunod éditeurs. ISBN 2-10-050668-2 (01/04/2008)
- [14] Directive 2008/98/CE relative aux déchets et abrogeant certaines directives. Parlement européen et Conseil. European Commission. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:312:0003:0030:FR:PDF> (19/11/2008)
- [15] National Environmental Management: Waste Act, 2008.. Republic of South Africa.
<http://sawic.environment.gov.za/documents/384.pdf> (10/03/2009)
- [16] Claire Bertolone, Marie-Odile Delorme, Aurélie Duhec, Alain Hénaut, Athmane Ouldali, Gucki Riva. Comment traiter les déchets en limitant la pollution ? IHEST. <http://www.ihest.fr/la-mediathèque/dossiers-123/les-dossiers-science-et-politiques/dossier-dechets> (20/06/2009)
- [17] Latifah Abd Manaf, Mohd Armi Abu Samah, Nur Ilyana Mohd Zukki. Municipal solid waste management in Malaysia: Practices and challenges. *Waste Management* **29** (2009) 2902-2906. doi:10.1016/j.wasman.2008.07.015 (21/06/2009)
- [18] Laurent Bletzacker, Hélène Chiapello, Marie-Odile Delorme, Philippe Ferrand, Marie Guegan, Alain Henaut, Marjolaine Matabos, Adria Necir, Johnny Nehme. Que faire de nos biodéchets : production d'énergie ou production de compost ? Etat des connaissances et des techniques de traitement pour une valorisation optimale. *Ingénierie* **57-58** (2009) 89-100. <https://www.set-revue.fr/sites/default/files/articles-eat/pdf/DG2009-PUB00027024.pdf> (09/10/2009)
- [19] 25 Years of RCRA: Building on Our Past to Protect Our Future. United States Environmental Protection Agency. <http://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/10000MAO.PDF?Dockey=10000MAO.PDF> (23/12/2009)
- [20] Hefa Cheng, Yuanan Hu. Municipal solid waste (MSW) as a renewable source of energy: Current and future practices in China. *Bioresource Technology* **101** (2010) 3816-3824. doi:10.1016/j.biortech.2010.01.040 (12/01/2010)
- [21] Jinglei Yu, Eric Williams, Meiting Ju, Chaofeng Shao. Managing e-waste in China: Policies, pilot projects and alternative approaches. *Resources, Conservation and Recycling* **54** (2010) 991-999. doi:10.1016/j.resconrec.2010.02.006 (17/02/2010)
- [22] Municipal Waste Management Report: Status-quo and Issues in Southeast and East Asian Countries. Regional Resource Center for Asia and the Pacific - United Nations Environment Programme. http://www.rrcap.ait.asia/Publications/MW_status_quo.pdf (02/09/2010)
- [23] Solid Waste Management in the World's Cities: Water and Sanitation in the World's Cities 2010. United Nations Human Settlements Programme. <http://unhabitat.org/books/solid-waste-management-in-the-worlds-cities-water-and-sanitation-in-the-worlds-cities-2010-2/> (05/11/2010)

- [24] Xinwen Chi, Martin Streicher-Porte, Mark Y.L. Wang, Markus A. Reuter. Informal electronic waste recycling: A sector review with special focus on China. *Waste Management* **31** (2011) 731-742. doi:10.1016/j.wasman.2010.11.006 (13/12/2010)
- [25] Viability of current and emerging technologies for domestic solid waste treatment and disposal . The World Bank. http://www-wds.worldbank.org/external/default/WDSContentServer/WDSP/IB/2012/06/26/000333037_20120626020438/Rendered/PDF/701660ESWOP1250an0Emissions00Final0.pdf (01/05/2011)
- [26] Xiaolong Zou. Municipal Solid Waste Management in China with Focus on Waste Separation. Ritsumeikan Asia Pacific University. <http://r-cube.ritsumei.ac.jp/bitstream/10367/3651/1/51209626.pdf> (30/06/2011)
- [27] Hua Wang, Jie He, Yoonhee Kim, Takuya Kamata. Municipal solid waste management in small towns: an economic analysis conducted in Yunnan, China. The World Bank. http://www-wds.worldbank.org/external/default/WDSContentServer/WDSP/IB/2011/08/22/000158349_20110822085839/Rendered/PDF/WPS5767.pdf (01/08/2011)
- [28] Daniel Dalet. Cartothèque. Académie d'Aix-Marseille. http://www.histgeo.ac-aix-marseille.fr/ancien_site/carto/index.htm (30/08/2011)
- [29] Joakim Krook, Niclas Svensson, Mats Eklund. Landfill mining: A critical review of two decades of research. *Waste Management* **32** (2012) 513-520. doi:10.1016/j.wasman.2011.10.015 (13/11/2011)
- [30] David Laner, Marion Crest, Heijo Scharff, Jeremy W.F. Morris, Morton A. Barlaz. A review of approaches for the long-term management of municipal solid waste landfills. *Waste Management* **32** (2012) 498-512. doi:10.1016/j.wasman.2011.11.010 (20/12/2011)
- [31] Solid Waste Management (Volume I Part II). United Nations Environment Programme. <http://www.unep.org/ietc/Portals/136/SWM-Vol1-Part2.pdf> (27/01/2012)
- [32] Solid Waste Management (Volume I Part III: Final Disposal). United Nations Environment Programme. <http://www.unep.org/ietc/Portals/136/SWM-Vol1-Part3.pdf> (27/01/2012)
- [33] Enquête sur les prix de l'incinération des déchets municipaux. ADEME. http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/82444_etude_incineration.pdf (21/03/2012)
- [34] Emma Watkins, Dominic Hogg, Andreas Mitsios, Shailendra Mudgal, Alexander Neubauer, Hubert Reisinger, Jenny Troeltzsch, Mike Van Acoleyen. Use of economic instruments to implement the waste hierarchy. European Commission. http://ec.europa.eu/environment/waste/pdf/final_report_10042012.pdf (11/04/2012)
- [35] Isabelle Zdanevitch. Etude comparative de la qualité de composts et de digestats issus de la fraction fermentescible d'ordures ménagères, collectée séparément ou en mélange. INERIS. <http://www.ineris.fr/centredoc/ineris-drc-12-125976-02525-b-red-1337010661.pdf> (02/05/2012)

- [36] A. Bosmans, I. Vanderreydt, D. Geysen, L. Helsen. The crucial role of Waste-to-Energy technologies in enhanced landfill mining: a technology review. *Journal of Cleaner Production* **55** (2013) 10-23. doi:10.1016/j.jclepro.2012.05.032 (29/05/2012)
- [37] Tanmoy Karak, R. M. Bhagat, Pradip Bhattacharyya. Municipal Solid Waste Generation, Composition, and Management: The World Scenario. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* **42** (2012) 1509-1630. doi:10.1080/10643389.2011.569871 (19/06/2012)
- [38] Mieke Quaghebeur, Ben Laenen, Daneel Geysen, Peter Nielsen, Yiannis Pontikes, Tom Van Gerven, Jeroen Spooren. Characterization of landfilled materials: screening of the enhanced landfill mining potential. *Journal of Cleaner Production* **55** (2013) 72-83. doi:10.1016/j.jclepro.2012.06.012 (03/07/2012)
- [39] Directive 2012/19/UE du Parlement européen et du Conseil du 4 juillet 2012 relative aux déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE). European Commission. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX%3A32012L0019> (04/07/2012)
- [40] Movements of waste across the EU's internal and external borders. European Environment Agency. http://www.eea.europa.eu/publications/movements-of-waste-EU-2012/at_download/file (29/10/2012)
- [41] Xianlai Zeng, Jinhui Li, A.L.N. Stevels, Lili Liu. Perspective of electronic waste management in China based on a legislation comparison between China and the EU. *Journal of Cleaner Production* **51** (2013) 80-87. doi:10.1016/j.jclepro.2012.09.030 (30/10/2012)
- [42] Nos déchets : de l'or dans nos poubelles. IRSTEA. <http://www.irstea.fr/sites/default/files/ckfinder/userfiles/files/DOSSIER%20DECHETS%20SYNTHESE%20BD0612.pdf> (06/12/2012)
- [43] Zainura Zainon Noor, Rafiu Olasunkanmi Yusuf, Ahmad Halilu Abba, Mohd Ariffin Abu Hassan, Mohd Fadhil Mohd Din. An overview for energy recovery from municipal solid wastes (MSW) in Malaysia scenario. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **20** (2013) 378-384. doi:10.1016/j.rser.2012.11.050 (09/01/2013)
- [44] Jinhui Li, Brenda N. Lopez N., Lili Liu, Nana Zhao, Keli Yu, Lixia Zheng. Regional or global WEEE recycling. Where to go? *Waste Management* **33** (2013) 923-934. doi:10.1016/j.wasman.2012.11.011 (20/01/2013)
- [45] Hezhong Tian, Jiajia Gao, Jiming Hao, Long Lu, Chuanyong Zhu, Peipei Qiu. Atmospheric pollution problems and control proposals associated with solid waste management in China: A review. *Journal of Hazardous Materials* **252-253** (2013) 142-154. doi:10.1016/j.jhazmat.2013.02.013 (18/02/2013)
- [46] La consommation des ménages. Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer. <http://www.developpement-durable.gouv.fr/La-consommation-des-menages,31801.html> (08/03/2013)
- [47] Tommi Kaartinen, Kai Sormunen, Jukka Rintala. Case study on sampling, processing and characterization of landfilled municipal solid waste in the view of landfill mining. *Journal of Cleaner Production* **55** (2013) 56-66. doi:10.1016/j.jclepro.2013.02.036 (14/03/2013)

- [48] David C. Wilson, Costas A. Velis, Ljiljana Rodic. Integrated sustainable waste management in developing countries. *Waste and Resource Management* **166** (2013) 52-68.
doi:10.1680/warm.12.00005 (01/05/2013)
- [49] Cristina Montejo, Davide Tonini, María del Carmen Márquez, Thomas Fruergaard Astrup. Mechanical-biological treatment: Performance and potentials. An LCA of 8 MBT plants including waste characterization. *Journal of Environmental Management* **128** (2013) 661-673.
doi:10.1016/j.jenvman.2013.05.063 (09/07/2013)
- [50] Chukwunonye Ezeah, Jak A. Fazakerley, Clive L. Roberts. Emerging trends in informal sector recycling in developing and transition countries. *Waste Management* **33** (2013) 2509-2519.
doi:10.1016/j.wasman.2013.06.020 (22/07/2013)
- [51] Garth T. Hickle. Moving beyond the “patchwork”: a review of strategies to promote consistency for extended producer responsibility policy in the U.S. *Journal of Cleaner Production* **64** (2014) 266-276. doi:10.1016/j.jclepro.2013.08.013 (20/08/2013)
- [52] Gwynn Guilford. A lot of US plastic isn't actually being recycled since China put up its Green Fence. *Quartz*. <http://qz.com/122003/plastic-recycling-china-green-fence/> (16/09/2013)
- [53] Nickolas J. Themelis, Charles Mussche. Municipal solid waste management and waste-to-energy in the United States, China and Japan. *2nd International Academic Symposium on Enhanced Landfill Mining - Houthalen-Helchteren*. http://elfm.eu/Uploads/ELFM/FILE_73D907E9-8225-4B93-91F8-10F71F59B793.PDF (14/10/2013)
- [54] World Energy Resources: Waste to Energy World Energy Council 2013. World Energy Council. https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2013/10/WER_2013_7b_Waste_to_Energy.pdf (14/10/2013)
- [55] Directives pour établir des stratégies nationales de gestion des déchets. United Nations Environment Programme.
<http://www.unep.org/ietc/Portals/136/Publications/Waste%20Management/UNEP%20NWMS%20Fr%20en%20Screen.pdf> (21/10/2013)
- [56] Panate Manomaivibool, Jong Ho Hong. Two decades, three WEEE systems: How far did EPR evolve in Korea's resource circulation policy? *Resources, Conservation and Recycling* **83** (2014) 202-212. doi:10.1016/j.resconrec.2013.10.011 (21/10/2013)
- [57] Stockage des déchets non dangereux gérés par les collectivités - Les prix en 2012. ADEME.
http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/90081_stockage-dechets-non-dangereux-prix-2012.pdf (25/10/2013)
- [58] Quinzième inventaire Édition 2013 La production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde - Collection chiffres et statistiques. Observ'ER. <http://www.energies-renouvelables.org/observ-er/html/inventaire/Fr/sommaire.asp> (09/12/2013)
- [59] Dolly Shine. Generation and Disposition of Municipal Solid Waste (MSW) in the United States - A National Survey. Columbia University.
http://www.seas.columbia.edu/earth/wtert/sofos/Dolly_Shin_Thesis.pdf (03/01/2014)

- [60] S. Masi, D. Caniani, E. Grieco, D.S. Lioi, I.M. Mancini. Assessment of the possible reuse of MSW coming from landfill mining of old open dumpsites. *Waste Management* **34** (2014) 702-710. doi:10.1016/j.wasman.2013.12.013 (10/01/2014)
- [61] Jean Germain, Pierre Jarlier. Rapport d'information fait au nom de la commission des finances sur le bilan et les perspectives d'évolution de la redevance et de la taxe d'enlèvement des ordures ménagères (REOM et TEOM). Sénat. <http://www.senat.fr/rap/r13-323/r13-3231.pdf> (29/01/2014)
- [62] La gestion des déchets ménagers : des progrès inégaux au regard des enjeux environnementaux. Cour des comptes. http://www.ccomptes.fr/content/download/64953/1553683/file/2_2_gestion_dechets_menagers_tome_II.pdf (11/02/2014)
- [63] Municipal Solid Waste Generation, Recycling, and Disposal in the United States: Facts and Figures for 2012. United States Environmental Protection Agency. https://www3.epa.gov/epawaste/nonhaz/municipal/pubs/2012_msw_fs.pdf (27/02/2014)
- [64] Yoonjung Seo. Current MSW Management and Waste-to-Energy Status in the Republic of Korea. Columbia University. http://www.seas.columbia.edu/earth/wtert/sofos/YS%20Thesis_final_Nov3.pdf (03/04/2014)
- [65] Municipal Solid Waste Profiling. Fraunhofer Institute for Building Physics. http://www.waste2go.eu/download/1/D2.2_Waste%20profiling.pdf (10/04/2014)
- [66] Lijun Zheng, Jiancheng Song, Chuanyang Li, Yunguang Gao, Pulong Geng, Binni Qu, Linyan Lin. Preferential policies promote municipal solid waste (MSW) to energy in China: Current status and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **36** (2014) 135-148. doi:10.1016/j.rser.2014.04.049 (09/05/2014)
- [67] Chunlong Liu. How Does the Chinese E-waste Disposal Fund Scheme Work. Ministry of Environmental Protection of China. <https://www.oecd.org/environment/waste/China%20case%20study%20final.pdf> (26/05/2014)
- [68] Chuanbin Zhou, Wenjun Fang, Wanying Xu, Aixin Cao, Rusong Wang. Characteristics and the recovery potential of plastic wastes obtained from landfill mining. *Journal of Cleaner Production* **80** (2014) 80-86. doi:10.1016/j.jclepro.2014.05.083 (07/06/2014)
- [69] Global Forum on Environment: Promoting Sustainable Materials Management through Extended Producer Responsibility (EPR). OECD. <http://www.oecd.org/environment/waste/gfenv-extendedproducerresponsibility-june2014.htm> (17/06/2014)
- [70] Results-based financing for municipal solid waste (Vol. 2): Main report. The World Bank. http://www-wds.worldbank.org/external/default/WDSContentServer/WDSP/IB/2014/10/28/000333037_20141028002605/Rendered/PDF/918610v20WPOFM0BE0CATALOGED0BY0WED0.pdf (01/07/2014)
- [71] Heijo Scharff. Landfill reduction experience in The Netherlands. *Waste Management* **34** (2014) 2218-2224. doi:10.1016/j.wasman.2014.05.019 (04/07/2014)

- [72] J. Vehlow. Air pollution control systems in WtE units: An overview. *Waste Management* **37** (2015) 58-74. doi:10.1016/j.wasman.2014.05.025 (09/07/2014)
- [73] Thomas Fruergaard Astrup, Davide Tonini, Roberto Turconi, Alessio Boldrin. Life cycle assessment of thermal Waste-to-Energy technologies: Review and recommendations. *Waste Management* **37** (2015) 104-115. doi:10.1016/j.wasman.2014.06.011 (19/07/2014)
- [74] Solid Waste Management and Recycling Technology of Japan - Toward a Sustainable Society. Japan Ministry of the Environment. <https://www.env.go.jp/en/recycle/smcs/attach/swmrt.pdf> (25/07/2014)
- [75] David C. Wilson, Ljiljana Rodic, Anne Scheinberg, Costas Velis, Graham Alabaster. Comparative analysis of solid waste management in 20 cities. *Waste Management & Research* **30** (2012) 237-254.. http://spiral.imperial.ac.uk:8080/bitstream/10044/1/14684/2/Waste%20Management%20%26%20Research_30_3_2012.pdf (28/07/2014)
- [76] Qingbin Song, Jinhui Li, Xianlai Zeng. Minimizing the increasing solid waste through zero waste strategy. *Journal of Cleaner Production* **104** (2015) 199-210. doi:10.1016/j.jclepro.2014.08.027 (21/08/2014)
- [77] David Lerpiniere, David C Wilson, Costas Velis, Barbara Evans, Hinrich Voss, Kris Moodley. A Review of International Development Co-operation in Solid Waste Management. International Solid Waste Association. http://www.iswa.org/fileadmin/galleries/Task_Forces/TFGWM_Report_Review_International_DCSW_M.pdf (01/09/2014)
- [78] Costas Velis. Global recycling markets - plastic waste: A story for one player - China. International Solid Waste Association. https://www.iswa.org/fileadmin/galleries/Task_Forces/TFGWM_Report_GRM_Plastic_China_LR.pdf (04/09/2014)
- [79] Won-Seok Yang, Jun-Kyung Park, Se-Won Park, Yong-Chil Seo. Past, present and future of waste management in Korea. *J Mater Cycles Waste Manag* **17** (2015) 207-217. doi:10.1007/s10163-014-0301-7 (06/09/2014)
- [80] Garth T. Hickie. An examination of governance within extended producer responsibility policy regimes in North America. *Resources, Conservation and Recycling* **92** (2014) 55-65. doi:10.1016/j.resconrec.2014.08.007 (16/09/2014)
- [81] ECN-QAS - European Quality Assurance Scheme for Compost and Digestate. European Compost Network ECN e.V.. http://www.materiarinnovabile.it/partners/ECN/141015_Summary_ECN-QAS-Manual_2nd%20edition_final.pdf (15/10/2014)
- [82] Chuanbin Zhou, Zhe Gong, Junsong Hu, Aixian Cao, Hanwen Liang. A cost-benefit analysis of landfill mining and material recycling in China. *Waste Management* **35** (2015) 191-198. doi:10.1016/j.wasman.2014.09.029 (27/10/2014)

- [83] Emballages industriels, commerciaux et ménagers - Données 2012 - Synthèse. ADEME.
<http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/emballages-icm-2012-8227.pdf>
(27/10/2014)
- [84] Results-based financing for municipal solid waste : Executive summary. The World Bank.
http://www-wds.worldbank.org/external/default/WDSContentServer/WDSP/IB/2014/10/28/000333037_20141028001155/Rendered/PDF/918610v10WP0FM0BE0CATALOGUED0BY0WED.pdf (28/10/2014)
- [85] Emballages ménagers - Données 2013. ADEME.
<http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/emballages-menagers-2013-8226.pdf>
(03/11/2014)
- [86] Toshihiko Matsuto, Xin Zhang, Takayuki Matsuo, Shuhei Yamada. Onsite survey on the mechanism of passive aeration and air flow path in a semi-aerobic landfill. *Waste Management* **36** (2015) 204-212. doi:10.1016/j.wasman.2014.11.007 (28/11/2014)
- [87] Lidia Lombardi, Ennio Carnevale, Andrea Corti. A review of technologies and performances of thermal treatment systems for energy recovery from waste. *Waste Management* **37** (2015) 26-44. doi:10.1016/j.wasman.2014.11.010 (18/12/2014)
- [88] Thi Phuong Thuy Pham, Rajni Kaushik, Ganesh K. Parshetti, Russell Mahmood, Rajasekhar Balasubramanian. Food waste-to-energy conversion technologies: Current status and future directions. *Waste Management* **38** (2015) 399-408. doi:10.1016/j.wasman.2014.12.004 (30/12/2014)
- [89] Daniel Lindberg, Camilla Molin, Mikko Hupa. Thermal treatment of solid residues from WtE units: A review. *Waste Management* **37** (2015) 82-94. doi:10.1016/j.wasman.2014.12.009 (12/01/2015)
- [90] Judy Li. Ways Forward from China's Urban Waste Problem. *The Nature of Cities*.
<http://www.thenatureofcities.com/2015/02/01/ways-forward-from-chinas-urban-waste-problem/>
(01/02/2015)
- [91] Jian Wu & Weiqian Zhang & Jiakuan Xu & Yue Che. A quantitative analysis of municipal solid waste disposal charges in China. *Environ Monit Assess* (2015) 187: 60. doi:10.1007/s10661-015-4305-0 (03/02/2015)
- [92] China Statistical Yearbook 2014. China Statistics Press.
<http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2014/indexeh.htm> (18/02/2015)
- [93] The European environment state and outlook 2015. European Environment Agency.
<http://www.eea.europa.eu/soer-2015/explore-quick-facts-and-figures> (27/02/2015)
- [94] Ciprian Cimpan, Anja Maul, Michael Jansen, Thomas Pretz, Henrik Wenzel. Central sorting and recovery of MSW recyclable materials: A review of technological state-of-the-art, cases, practice and implications for materials recycling. *Journal of Environmental Management* **156** (2015) 181-199. doi:10.1016/j.jenvman.2015.03.025 (03/04/2015)

- [95] Ngoc Bao Dung Thi, Gopalakrishnan Kumar, Chiu-Yue Lin. An overview of food waste management in developing countries: Current status and future perspective. *Journal of Environmental Management* **157** (2015) 220-229. doi:10.1016/j.jenvman.2015.04.022 (21/04/2015)
- [96] Valor'Aisne Compte-rendu des délibérations du Comité syndical du 27 mars 2015. Valor'Aisne. http://www.valoraisne.fr/userfiles/files/CR_délibérations_Comité_11_déc2015.pdf (22/04/2015)
- [97] Les installations de traitement des ordures ménagères en France - Données 2012. ADEME. http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/8223_enquete_itom-donnees2012_web.pdf (24/04/2015)
- [98] Arya Tripathy. Waste Management in India: An Overview. PSA Legal Counsellors. http://www.psalegal.com/upload/publication/assocFile/EnviornmentBulletin-IssueIV.pdf?utm_source=Mondaq&utm_medium=syndication&utm_campaign=View-Original (07/05/2015)
- [99] Latin America and Caribbean - Review of waste minimisation programmes. The World Bank. http://www-wds.worldbank.org/external/default/WDSContentServer/WDSP/LCR/2015/06/05/090224b082ef9233/2_0/Rendered/PDF/Review0of0waste0minimisation0programmes.pdf (11/05/2015)
- [100] Liang Dong, Tsuyoshi, Ming Dai, Yong Geng, Jingzheng Ren, Minoru Fujii, Yi Wang, Satoshi Ohnishi. Towards preventative eco-industrial development: an industrial and urban symbiosis case in one typical industrial city in China. *Journal of Cleaner Production* **114** (2016) 387-400. doi:10.1016/j.jclepro.2015.05.015 (14/05/2015)
- [101] World steel recycling in figures 2010-2014. World Steel Association. http://bdsv.org/downloads/weltstatistik_2010_2014.pdf (26/05/2015)
- [102] Waste Crime - Waste Risks: Gaps in Meeting the Global Waste Challenge. GRID-Arendal. <http://www.grida.no/publications/rr/waste-crime/> (26/05/2015)
- [103] Sabrina Orlins, Dabo Guan. China's toxic informal e-waste recycling: local approaches to a global environmental problem. *Journal of Cleaner Production* **114** (2016) 71-80. doi:10.1016/j.jclepro.2015.05.090 (01/06/2015)
- [104] Shengen Zhang, Yunji Ding, Bo Liu, De'an Pan, Chein-chi Chang, Alex A. Volinsky. Challenges in legislation, recycling system and technical system of waste electrical and electronic equipment in China. *Waste Management* **45** (2015) 361-373. doi:10.1016/j.wasman.2015.05.015 (06/06/2015)
- [105] Advancing Sustainable Materials Management: Facts and Figures 2013. United States Environmental Protection Agency. https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/2013_advncng_smm_rpt.pdf (11/06/2015)
- [106] Syctom Rapport d'activité 2014. Syctom, l'agence métropolitaine des déchets ménagers. <http://www.syctom-paris.fr/pdf/rapport2014/Rapport-activite-syctom-2014.pdf> (18/06/2015)

- [107] Federica Cucchiella, Idiano D'Adamo, S.C. Lenny Koh, Paolo Rosa. Economic Assessment Shows E-Waste Recycling is an Industry Worth Billions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **51** (2015) 263-272. doi:10.1016/j.rser.2015.06.010 (22/06/2015)
- [108] Bilan National du Recyclage (BNR) 2003-2012. ADEME.
<http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/bilan-national-recyclage-2003-2012-synthese-201503.pdf> (23/06/2015)
- [109] CEPI Key Statistics 2014. Confederation of European Paper Industries (CEPI).
<http://www.cepi.org/system/files/public/documents/publications/statistics/2015/Key%20Statistics%202014%20FINAL.pdf> (03/07/2015)
- [110] China: Environmental Services. Goldman Sachs Global Investment Research.
<http://www.goldmansachs.com/our-thinking/pages/interconnected-markets-folder/chinas-environment/report.pdf> (13/07/2015)
- [111] Materials Generated in the U.S. Municipal Waste Stream - EPA Environmental Dataset Gateway. United States Environmental Protection Agency.
https://edg.epa.gov/data/PUBLIC/OSWER/ORCR/DATA%20GOV%20ALL%20TABLES%201960%20TO%202013_5-13-2015.xlsx (21/07/2015)
- [112] Products with Detail on Containers and Packaging in the U.S. Municipal Waste Stream. United States Environmental Protection Agency.
https://edg.epa.gov/data/PUBLIC/OSWER/ORCR/DATA%20GOV%20ALL%20TABLES%201960%20TO%202013_5-13-2015.xlsx (21/07/2015)
- [113] Statut de déchet. Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer.
<http://www.developpement-durable.gouv.fr/-Statut-de-dechet-.html> (27/07/2015)
- [114] Qingbin Song, Jinhui Li, Lili Liu, Qingyin Dong, Jie Yang, Yangyang Liang, Chao Zhang. Measuring the generation and management status of waste office equipment in China: a case study of waste printers. *Journal of Cleaner Production* **112** (2016) 4461-4468. doi:10.1016/j.jclepro.2015.07.106 (29/07/2015)
- [115] Neha Gupta, Krishna Kumar Yadav, Vinit Kumar. A review on current status of municipal solid waste management in India. *Journal of Environmental Sciences* **37** (2015) 206-217. doi:10.1016/j.jes.2015.01.034 (30/07/2015)
- [116] Ciprian Cimpan, Anja Maul, Henrik Wenzel, Thomas Pretz. Techno-economic assessment of central sorting at material recovery facilities - the case of lightweight packaging waste. *Journal of Cleaner Production* **112** (2016) 4387-4397. doi:10.1016/j.jclepro.2015.09.011 (12/09/2015)
- [117] P. Sarath, Sateesh Bonda, Smita Mohanty, Sanjay K. Nayak. Mobile phone waste management and recycling: Views and trends. *Waste Management* **46** (2015) 536-545. doi:10.1016/j.wasman.2015.09.013 (14/09/2015)
- [118] Kodwo Miezah, Kwasi Obiri-Danso, Zsófia Kádár, Bernard Fei-Baffoe, Moses Y. Mensah. Municipal solid waste characterization and quantification as a measure towards effective waste

management in Ghana. *Waste Management* **46** (2015) 15-27. doi:10.1016/j.wasman.2015.09.009 (28/09/2015)

[119] Global Waste Management Outlook (GWMO) . United Nations Environment Programme. <http://unep.org/ietc/ourwork/wastemanagement/GWMO> (09/11/2015)

[120] Revision of the Waste Framework Directive. European Commission. <http://ec.europa.eu/environment/waste/framework/revision.htm> (11/11/2015)

[121] Assessment of separate collection schemes in the 28 capitals of the EU. European Commission. http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/pdf/Separate%20collection_Final%20Report.pdf (13/11/2015)

[122] S. Salhofer, B. Steuer, R. Ramusch, P. Beigl. WEEE management in Europe and China - A comparison. *Waste Management* **xxx** (2015) xxx-xxx. doi:10.1016/j.wasman.2015.11.014 (25/11/2015)

[123] Alec Liu, Fei Ren, Wenlin Yvonne Lin, Jing-Yuan Wang. A review of municipal solid waste environmental standards with a focus on incinerator residues. *International Journal of Sustainable Built Environment* **4** (2015) 165-188. doi:10.1016/j.ijbsbe.2015.11.002 (28/11/2015)

[124] Paquet « économie circulaire » : questions et réponses. European Commission. http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-15-6204_fr.htm (02/12/2015)

[125] Proposition de Directive du Parlement Européen et du Conseil modifiant la directive 2008/98/CE relative aux déchets COM(2015) 595 final. European Commission. http://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:c2b5929d-999e-11e5-b3b7-01aa75ed71a1.0017.02/DOC_1&format=PDF (02/12/2015)

[126] Waste prevention in Europe - the status in 2014. European Environment Agency. http://www.eea.europa.eu/publications/waste-prevention-in-europe-2015/at_download/file (07/12/2015)

[127] Waste generation by economic activity and households, 2012. European Commission. http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/images/c/ca/SE_waste_statistics_07122015_LB.xlsx (07/12/2015)

[128] Waste statistics. European Commission. http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Waste_statistics (14/12/2015)

[129] EPA History: Resource Conservation and Recovery Act. United States Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/aboutepa/epa-history-resource-conservation-and-recovery-act> (05/01/2016)

[130] Les filières à Responsabilité élargie du producteur. ADEME. http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/rep_panorama_edition_2015.pdf (22/01/2016)

[131] Transferts transfrontaliers de déchets. Direction générale des douanes et droits indirects. <http://www.douane.gouv.fr/articles/a10915-transferts-transfrontaliers-de-dechets> (28/01/2016)

- [132] Review of the Thematic Strategy on the prevention and recycling of waste. European Commission. <http://ec.europa.eu/environment/waste/use.htm> (29/01/2016)
- [133] Review of Waste Policy and Legislation. European Commission. http://ec.europa.eu/environment/waste/target_review.htm (08/02/2016)
- [134] Will Flower. What Operation Green Fence has Meant for Recycling. Waste360. <http://waste360.com/business/what-operation-green-fence-has-meant-recycling> (11/02/2016)
- [135] LOI n° 2016-138 du 11 février 2016 relative à la lutte contre le gaspillage alimentaire. *Journal officiel*. <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000032036289&dateTexte=&categorieLien=id> (12/02/2016)
- [136] Closing the loop - An EU action plan for the Circular Economy. European Commission. <http://ec.europa.eu/environment/circular-economy/> (19/02/2016)
- [137] Hazardous Waste Regulations: User-Friendly Reference Documents. United States Environmental Protection Agency. <https://www3.epa.gov/epawaste/hazard/refdocs.htm> (22/02/2016)
- [138] Municipal waste. Eurostat. <http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do> (25/02/2016)
- [139] Ghana. The World Factbook - CIA. <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/geos/gh.html> (25/02/2016)
- [140] Jenny Gustavsson, Christel Cederberg, Ulf Sonesson, Robert van Otterdijk, Alexandre Meybeck. Global food losses and food waste - Extent, causes and prevention. FAO. <http://www.fao.org/docrep/014/mb060e/mb060e00.pdf> (04/03/2016)
- [141] Rapport Annuel des données 2014 - Registre DEEE. ADEME. http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/rapport_annuel_deee_donnees_2014_201603.pdf (10/03/2016)
- [142] Etat des énergies renouvelables en Europe - 15^e baromètre bilan. EurObserv'ER. <http://www.eurobserv-er.org/pdf/annual-overview-2015-fr-observer/> (17/03/2016)
- [143] Recycling rates for packaging waste. Eurostat. <http://ec.europa.eu/eurostat/web/products-datasets/-/ten00063> (23/03/2016)
- [144] Gasification: Map of Facilities. Gasification and Syngas Technologies Council. <http://www.gasification-syngas.org/resources/map-of-gasification-facilities/> (04/04/2016)
- [145] Lingen Zhang, Zhenming Xu. A review of current progress of recycling technologies for metals from waste electrical and electronic equipment. *Journal of Cleaner Production* xxx (2016) 1-18. doi:10.1016/j.jclepro.2016.04.004 (04/04/2016)
- [146] Interdiction des sacs plastique à usage unique en caisse à partir de juillet 2016. Direction de l'information légale et administrative (Premier ministre). <https://www.service-public.fr/professionnels-entreprises/actualites/008384> (05/04/2016)

[147] Step e-waste world map. United Nations University. <http://www.step-initiative.org/step-e-waste-world-map.html> (20/04/2016)

[148] Phase-out of lightweight plastic bags. Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Phase-out_of_lightweight_plastic_bags?oldid=715608524 (25/04/2016)