



NIMBONA Guillaume

**LE PRINCIPE DE L'ANALYSE DU CYCLE DE VIE POUR
L'OPTIMISATION DE LA GESTION DES DECHETS
SOLIDES DANS LES PAYS EN DEVELOPPEMENT :
COMPARAISON ENTRE COMPOSTAGE ET
ENFOUISSEMENT**

Mémoire présenté
à l'université internationale de langue française au service
du développement africain

Université Senghor

pour l'obtention de Master en Développement

**DÉPARTEMENT ENVIRONNEMENT
(SPECIALITÉ: GESTION DE L'ENVIRONNEMENT)**

Encadreurs :

1. Dr. Caroline Gallez
2. Prof. Guy Matejka

**Egypte
Alexandrie
Avril 2007**

Dédicaces

A mon père

A ma regrettée mère

A mes frères et sœurs

A tous ceux qui me sont chers

Je dédie ce mémoire

Résumé

L'acuité des problèmes environnementaux générés par les déchets a motivé la mise en place des solutions techniques, puis des outils d'analyse environnementale permettant d'évaluer ou de comparer l'efficacité de ces solutions. L'activité relative à la « gestion des déchets » dans les pays en développement (PED) est généralement perçue comme un tout alors que les enjeux environnementaux qui lui sont associés sont autant variables qu'hétérogènes : respect de la qualité de l'air, qualité de l'eau, qualité des sols, effet de serre, l'eutrophisation, l'acidification, consommation des ressources et de l'espace, etc. Il est grand temps qu'une approche holistique claire et compréhensible de ces enjeux soit mise en oeuvre par les acteurs directs et indirects du déchet tout en se préoccupant de l'évaluation de la contribution des activités d'élimination des déchets sur chacun d'eux. La démarche liée à la perception de ces enjeux consisterait à :

(i) identifier d'une part le lien entre les flux de déchets et les flux élémentaires engendrés par les procédés de traitement, et d'autre part le lien entre les flux élémentaires et les multiples impacts potentiels ou réels sur l'environnement ; (ii) mettre en perspective un enjeu environnemental donné par rapport à d'autres, responsables des conséquences finales identiques. Dans ce cas, il faut non seulement identifier les autres enjeux environnementaux mais aussi connaître leurs contributions relatives aux conséquences finales. Face à ces difficultés, on développe dans cette étude, une méthodologie d'adaptation de l'analyse du cycle de vie (ACV) au compostage et à la mise en décharge des déchets ménagers solides qui semblent être les plus exploités dans les DED, les pays du sud en particulier. A cet effet, on développe deux approches d'ACV : (i) la première est basée sur l'analyse des impacts environnementaux des déchets dès qu'ils sont produits à partir de la fin de vie des produits jusqu'à leur valorisation ou à leur traitement final (de la tombe à la réincarnation). Cette approche a permis de conclure que les PED sont beaucoup plus concernés par ce qu'on a appelé « analyse horizontale » ; c'est à dire que ce sont les collectivités locales, les industriels des déchets et les législateurs qui doivent optimiser leur approche de gestion des déchets ménagers dans la mesure où ils n'ont pas d'influence directe sur les concepteurs et les fabricants pour les obliger à optimiser les performances ou cycles de vie de leurs produits ; (ii) la deuxième approche est basée sur l'analyse des fonctions remplies par les différentes opérations du compostage et du stockage, en vue de déceler la filière qui génère moins de fonctions inutiles (c'est à dire moins d'impacts environnementaux). Après analyse de cette approche, on a constaté que c'est plutôt la mise en décharge qui génère plus de fonctions inutiles. Enfin, on a fait l'inventaire de tous les facteurs de caractérisation permettant d'évaluer la contribution de chaque flux environnemental à chaque catégorie d'impacts de façon quantitative. La description qualitative et/ou quantitative d'un impact est traduite par des indicateurs d'impact ou des indices opérationnels.

Tables des matières

Dédicaces	ii
A mon père.....	ii
A ma regrettée mère.....	ii
A mes frères et sœurs.....	ii
A tous ceux qui me sont chers.....	ii
Je dédie ce mémoire.....	ii
Résumé.....	iii
Liste des tableaux.....	vii
Liste des figures.....	xi
Liste des Sigles et abréviations.....	xv
ACV : Analyse du Cycle de Vie.....	xv
ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie.....	xv
ADSE : Association de Défense de Saint-Escobille.....	xv
AFNOR : Agence Française de Normalisation.....	xv
AGV : Acides Gras Volatils.....	xv
AHLLN : Association des Habitants de Louvain La Neuve.....	xv
ALCAN : African Life Assessment Network.....	xv
AP : Acidification Potential.....	xv
CET : Centre d'Enfouissement Technique.....	xv
CFC : Chloro-Fluoro-Carbone.....	xv
CNIID : Centre d'Information Indépendante sur les Déchets.....	xv
COT : Carbone Organique Total.....	xv
COV : Composés Organiques Volatils.....	xvi
DB : Déchets Banals.....	xvi
DBO : Demande Biologique en Oxygène.....	xvi
DCO : Demande Chimique en Oxygène.....	xvi
DD : Déchets Dangereux.....	xvi
DI : Déchets Inertes.....	xvi
DO : Déchets Organiques.....	xvi
DS : Déchets Spéciaux.....	xvi
ENSP : Ecole Nationale de la santé publique.....	xvi
EP : Eutrofication Potential.....	xvi
GCV : Gestion du Cycle de Vie.....	xvi
GWP : Global Warming Potential.....	xvi
HBFC : Hydro-Bromo-Fluoro-Carbone.....	xvi
HCFC : Hydro-Chloro-Fluoro-Carbone.....	xvi
IEPF : Institut de l'Energie et de l'Environnement de la Francophonie.....	xvi
IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change.....	xvi
ISO : Organisation Internationale de Standardisation.....	xvi
MWh : Mega-Watt-heure.....	xvi
ODP : Ozone Depletion Potentials.....	xvi
ONU : Organisation des Nations Unies.....	xvi
PCB : PolyChoro-Biphényles.....	xvi
PED : Pays En Développement.....	xvi
PNUD : Programme des Nations Unis pour le Développement.....	xvi
PNUE : Programme des Nations Unies pour l'Environnement.....	xvi
PRC : Potentiel de Rechauffement Climatique.....	xvi

Remerciements.....	xvi
Introduction.....	1
Chapitre I. Généralités sur les déchets.....	3
1. Problématique historique de la gestion des déchets.....	3
2. Concept de déchet : définitions.....	4
2.1. Conception économique.....	5
2.2. Conception sociale.....	5
2.3. Conception juridique.....	5
2.4. Conception environnementale.....	6
3. Classification.....	6
3.1. Selon l'origine.....	7
3.2. Selon la nature (Jean-Michel Balet, 2005).....	8
4. Caractéristiques des déchets ménagers solides.....	10
5. Problèmes de gestion des déchets ménagers dans les PED : flux et composition.....	11
Tableau 1 : Composition moyenne (pourcentage pondéral) des déchets ménagers dans les villes des pays en développement.....	13
Tableau 2 : Composition des déchets dans plusieurs pays (en % massique)	13
Tableau 3 : Comparaison de la production et de la composition des déchets ménagers dans différents quartiers de Dakar et de Ouagadougou (en % pondéral).....	14
Chapitre II. Enjeux environnementaux associés aux filières de gestion des déchets solides ménagers.....	15
Les enjeux environnementaux associés à la gestion des déchets solides ménagers dans les pays en développement par les filières de compostage et de stockage sont extrêmement variables et hétérogènes: consommation des ressources naturelles, pollutions environnementales, perturbations environnementales, etc. Cependant, face à ces enjeux, chaque acteur impliqué dans la gestion des déchets appréhende la dimension environnementale en fonction des préoccupations prioritaires et directes et à une échelle temporelle et géographique spécifique. Les riverains d'une décharge vont par exemple se préoccuper des effets de pollutions olfactives sur la santé humaine (préoccupations directes) liés aux émissions directes (échelle temporelle) à une échelle locale (échelle géographique) sans prendre en compte les autres enjeux environnementaux, plus globaux, liés à la gestion des déchets. En bref, chacun ne perçoit et n'est sensible qu'à un nombre limité de problèmes environnementaux, essentiellement par manque de connaissance des autres problèmes.....	15
1. Consommation des ressources naturelles.....	15
2. Les pollutions environnementales.....	16
2.1. L'augmentation de l'effet de serre.....	16
2.2. Augmentation de la teneur en bio- aérosols.....	17
2.3. Les nuisances sensorielles	18
2.4. Pollution métallique et organique des eaux et des sols.....	18
3. Les perturbations	19
3.1. L'altération du paysage.....	19
3.2. L'eutrophisation des milieux aquatiques.....	19
Chapitre III : Généralités sur l'Analyse du Cycle de Vie	20
1. Concepts et définition.....	20
2. Principes méthodologiques.....	21
Figure1 : Cadre méthodologique de l'ACV.....	21
Source : ISO14040, 1997.....	21
3. Complexité méthodologique de l'ACV.....	23
4. Place de l'ACV dans la gestion des déchets ménagers solides.....	25

5. Niveau d'application des idées de l'ACV dans les PED.....	26
Chapitre IV : Fonctions remplies par les principales filières d'élimination des déchets solides dans les PED.....	27
.....	27
1. Aperçu de la situation	27
2. Le compostage.....	28
2.1. Objectifs et principes de fonctionnement.....	28
Figure 2 : Schéma simplifié du processus de compostage.....	29
2.2. Les phases du compostage.....	30
2.3. Paramètres d'optimisation du compostage.....	30
Tableau 4 : Rapport C/N de quelques matières organiques compostables.....	32
Tableau 5 : Teneurs et limites normatives en métaux lourds de différents PED.....	32
2.4. Bénéfices du compostage.....	33
Tableau 6 : Teneurs (en%) en fertilisants et en métaux lourds des composts de quelques PED.....	34
3. La décharge.....	34
3.1. Rôles et principes de fonctionnement.....	34
3.2. Configuration d'un site de décharge	36
3.3. Caractéristiques quantitatives et qualitatives des lixiviats.....	37
Tableau 7 : Concentrations du lixiviat avec l'âge de l'enfouissement	38
3.4. Composition et caractéristiques du biogaz.....	38
Tableau 8 : Composition moyenne du biogaz issus des CET.....	39
3.5. Avantages de la mise en place d'un centre de stockage.....	40
Chapitre V. Etude des fonctions du compostage et de l'enfouissement au moyen de l'ACV.....	41
1. Analyse du cycle de vie co-fonctionnelle.....	41
2. Résolution du problème de l'ACVco-fonctionnelle.....	41
2.1. Prise en compte des co-fonctions simultanées sans élargir le système.....	42
2.2. Résolution par décomposition du système.....	43
2.3. Résolution sans décomposition du système.....	43
2.4. Résolution basée sur l'étude des causalités.....	44
2.5. Résolution basée sur une démarche arbitraire.....	45
3. Suivi des impacts au moyen de la construction d'un arbre des procédés.....	45
Figure 3 : Limites du système général incluant à la fois le compostage et l'enfouissement.....	47
Figure 4 : Limites du sous-système de collecte des ordures ménagères.....	48
Source : Auteur.....	48
Figure 5 : Limites du sous-système de compostage des ordures ménagères.....	49
Source :Auteur	49
Figure 6 : Limites du sous-système de stockage des déchets incluant les refus de tri et de compostage.....	50
5. Interprétation des systèmes.....	51
Les systèmes présentés peuvent être utilisés pour comparer des gammes de solutions en vue d'améliorer et rationaliser les procédés de traitement des déchets ménagers par compostage et enfouissement mis en place dans les pays en développement, ceux du sud en particulier. Pour chacune de ces deux filières, il est possible de prévoir la consommation d'énergie, les émissions dans les airs, dans l'eau ou le sol, le volume nécessaire à la mise en décharge des refus de traitement par compostage et même le coût global. A partir de ces systèmes, il est aussi possible de calculer les quantités de sous-produits générés par chaque sous système, tels que les matières récupérées, le	

compost ou l'énergie, et fournir des éléments de réponse quant à la capacité des débouchés envisagés. Il faut aussi souligner que le système ne détermine pas quelle est la meilleure filière du point de vue de l'environnement. Le choix de telle ou telle option est le reflet des priorités et des besoins locaux ou les stratégies nationales propres à chaque pays. Les systèmes fournissent des lumières à partir desquelles ces décisions et ces choix peuvent être effectués pour évoluer vers un développement durable dans la gestion des déchets ménagers. Enfin, on peut aussi identifier à partir de ces systèmes, celui qui engendre moins de fonctions inutiles c'est-à-dire moins de fonctions liées à la production des émissions dans l'environnement entre le compostage et la décharge.

L'on constate que c'est plutôt la mise en décharge qui accuse beaucoup de fonctions polluantes pour l'environnement. En effet, ces fonctions sont liées à la production des quantités importantes de biogaz et de lixiviats durant des centaines et des centaines d'années. Ces rejets affectent à la fois l'atmosphère, la lithosphère, la biosphère, bref tous les compartiments du milieu de vie.....51

Chapitre VI. Comment adapter l'ACV aux principales filières de gestion des déchets solides et au contexte des PED ?..... 52

..... 52

1. Contexte et justification de la nécessité d'utiliser l'ACV dans les PED..... 52

Figure7 : Exemple de transfert de pollution d'une étape du cycle de vie à une autre.... 53

2. De « la tombe à la réincarnation »..... 54

Figure 8 : ACV des déchets solides menée de la tombe à la réincarnation..... 55

3. Séparation des approches de responsabilité d'analyse verticale et horizontale.....56

4. Prise en compte de la dimension sociale..... 56

Chapitre VII. Description et caractérisation des impacts environnementaux du compostage et de la décharge..... 58

1. Terminologie relative à la notion d'impact environnemental.....58

2. Inventaire des impacts environnementaux associés au compostage..... 59

2.1. Impacts sur l'air 59

2.2. Les impacts sur l'eau et le sol 61

3. Inventaire des impacts environnementaux induits par la décharge..... 62

4. Méthodes de caractérisation des impacts environnementaux..... 65

4.1. Description des catégories..... 66

4.2. Facteurs de caractérisation..... 66

Tableau 9 : Inventaire des indicateurs d'impacts associés au compostage et au stockage des déchets ménagers : 1°) Collecte..... 67

4.3. Importance de la connaissance de l'inventaire des indicateurs d'impacts.....69

Conclusion..... 71

Références bibliographiques..... 72

Liste des tableaux

Dédicaces ii

A mon père..... ii

A ma regrettée mère..... ii

A mes frères et sœurs..... ii

A tous ceux qui me sont chers..... ii

Je dédie ce mémoire.....	ii
Résumé.....	iii
Liste des tableaux.....	vii
Liste des figures.....	xi
Liste des Sigles et abréviations.....	xv
ACV : Analyse du Cycle de Vie.....	xv
ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie.....	xv
ADSE : Association de Défense de Saint-Escobille.....	xv
AFNOR : Agence Française de Normalisation.....	xv
AGV : Acides Gras Volatils.....	xv
AHLLN : Association des Habitants de Louvain La Neuve.....	xv
ALCAN : African Life Assessment Network.....	xv
AP : Acidification Potential.....	xv
CET : Centre d'Enfouissement Technique.....	xv
CFC : Chloro-Fluoro-Carbone.....	xv
CNIID : Centre d'Information Indépendante sur les Déchets.....	xv
COT : Carbone Organique Total.....	xv
COV : Composés Organiques Volatils.....	xvi
DB : Déchets Banals.....	xvi
DBO : Demande Biologique en Oxygène.....	xvi
DCO : Demande Chimique en Oxygène.....	xvi
DD : Déchets Dangereux.....	xvi
DI : Déchets Inertes.....	xvi
DO : Déchets Organiques.....	xvi
DS : Déchets Spéciaux.....	xvi
ENSP : Ecole Nationale de la santé publique.....	xvi
EP : Eutrofication Potential.....	xvi
GCV : Gestion du Cycle de Vie.....	xvi
GWP : Global Warming Potential.....	xvi
HBFC : Hydro-Bromo-Fluoro-Carbone.....	xvi
HCFC : Hydro-Chloro-Fluoro-Carbone.....	xvi
IEPF : Institut de l'Energie et de l'Environnement de la Francophonie.....	xvi
IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change.....	xvi
ISO : Organisation Internationale de Standardisation.....	xvi
MWh : Mega-Watt-heure.....	xvi
ODP : Ozone Depletion Potentials.....	xvi
ONU : Organisation des Nations Unies.....	xvi
PCB : PolyChoro-Biphényles.....	xvi
PED : Pays En Développement.....	xvi
PNUD : Programme des Nations Unies pour le Développement.....	xvi
PNUE : Programme des Nations Unies pour l'Environnement.....	xvi
PRC : Potentiel de Rechauffement Climatique.....	xvi
Remerciements.....	xvi
Introduction.....	1
Chapitre I. Généralités sur les déchets.....	3
1. Problématique historique de la gestion des déchets.....	3
2. Concept de déchet : définitions.....	4
2.1. Conception économique.....	5
2.2. Conception sociale.....	5
2.3. Conception juridique.....	5

2.4. Conception environnementale.....	6
3. Classification.....	6
3.1. Selon l'origine.....	7
3.2. Selon la nature (Jean-Michel Balet, 2005).....	8
4. Caractéristiques des déchets ménagers solides.....	10
5. Problèmes de gestion des déchets ménagers dans les PED : flux et composition.....	11
Tableau 1 : Composition moyenne (pourcentage pondéral) des déchets ménagers dans les villes des pays en développement.....	13
Tableau 2 : Composition des déchets dans plusieurs pays (en % massique)	13
Tableau 3 : Comparaison de la production et de la composition des déchets ménagers dans différents quartiers de Dakar et de Ouagadougou (en % pondéral).....	14
Chapitre II. Enjeux environnementaux associés aux filières de gestion des déchets solides ménagers.....	15
Les enjeux environnementaux associés à la gestion des déchets solides ménagers dans les pays en développement par les filières de compostage et de stockage sont extrêmement variables et hétérogènes: consommation des ressources naturelles, pollutions environnementales, perturbations environnementales, etc. Cependant, face à ces enjeux, chaque acteur impliqué dans la gestion des déchets appréhende la dimension environnementale en fonction des préoccupations prioritaires et directes et à une échelle temporelle et géographique spécifique. Les riverains d'une décharge vont par exemple se préoccuper des effets de pollutions olfactives sur la santé humaine (préoccupations directes) liés aux émissions directes (échelle temporelle) à une échelle locale (échelle géographique) sans prendre en compte les autres enjeux environnementaux, plus globaux, liés à la gestion des déchets. En bref, chacun ne perçoit et n'est sensible qu'à un nombre limité de problèmes environnementaux, essentiellement par manque de connaissance des autres problèmes.....	15
1. Consommation des ressources naturelles.....	15
2. Les pollutions environnementales.....	16
2.1. L'augmentation de l'effet de serre.....	16
1.2. Augmentation de la teneur en bio- aérosols.....	17
2.3. Les nuisances sensorielles	18
2.4. Pollution métallique et organique des eaux et des sols.....	18
3. Les perturbations	19
3.1. L'altération du paysage.....	19
3.2. L'eutrophisation des milieux aquatiques.....	19
Chapitre III : Généralités sur l'Analyse du Cycle de Vie	20
1. Concepts et définition.....	20
2. Principes méthodologiques.....	21
Figure 1 : Cadre méthodologique de l'ACV.....	21
Source : ISO14040, 1997.....	21
3. Complexité méthodologique de l'ACV.....	23
4. Place de l'ACV dans la gestion des déchets ménagers solides.....	25
5. Niveau d'application des idées de l'ACV dans les PED.....	26
Chapitre IV : Fonctions remplies par les principales filières d'élimination des déchets solides dans les PED.....	27
.....	27
1. Aperçu de la situation	27
2. Le compostage.....	28
2.1. Objectifs et principes de fonctionnement.....	28
Figure 2 : Schéma simplifié du processus de compostage.....	29

2.2. Les phases du compostage.....	30
2.3. Paramètres d'optimisation du compostage.....	30
Tableau 4 : Rapport C/N de quelques matières organiques compostables.....	32
Tableau 5 : Teneurs et limites normatives en métaux lourds de différents PED.....	32
2.4. Bénéfices du compostage.....	33
Tableau 6 : Teneurs (en%) en fertilisants et en métaux lourds des composts de quelques PED.....	34
3. La décharge.....	34
3.1. Rôles et principes de fonctionnement.....	34
3.2. Configuration d'un site de décharge	36
3.3. Caractéristiques quantitatives et qualitatives des lixiviats.....	37
Tableau 7 : Concentrations du lixiviat avec l'âge de l'enfouissement	38
3.4. Composition et caractéristiques du biogaz.....	38
Tableau 8 : Composition moyenne du biogaz issus des CET.....	39
3.5. Avantages de la mise en place d'un centre de stockage.....	40
Chapitre V. Etude des fonctions du compostage et de l'enfouissement au moyen de l'ACV.....	41
1. Analyse du cycle de vie co-fonctionnelle.....	41
2. Résolution du problème de l'ACVco-fonctionnelle.....	41
2.1. Prise en compte des co-fonctions simultanées sans élargir le système.....	42
2.2. Résolution par décomposition du système.....	43
2.3. Résolution sans décomposition du système.....	43
2.4. Résolution basée sur l'étude des causalités.....	44
2.5. Résolution basée sur une démarche arbitraire.....	45
3. Suivi des impacts au moyen de la construction d'un arbre des procédés.....	45
Figure 3 : Limites du système général incluant à la fois le compostage et l'enfouissement.....	47
Figure 4 : Limites du sous-système de collecte des ordures ménagères.....	48
Source : Auteur.....	48
Figure 5 : Limites du sous-système de compostage des ordures ménagères.....	49
Source :Auteur	49
Figure 6 : Limites du sous-système de stockage des déchets incluant les refus de tri et de compostage.....	50
5. Interprétation des systèmes.....	51

Les systèmes présentés peuvent être utilisés pour comparer des gammes de solutions en vue d'améliorer et rationaliser les procédés de traitement des déchets ménagers par compostage et enfouissement mis en place dans les pays en développement, ceux du sud en particulier. Pour chacune de ces deux filières, il est possible de prévoir la consommation d'énergie, les émissions dans les airs, dans l'eau ou le sol, le volume nécessaire à la mise en décharge des refus de traitement par compostage et même le coût global. A partir de ces systèmes, il est aussi possible de calculer les quantités de sous-produits générés par chaque sous système, tels que les matières récupérées, le compost ou l'énergie, et fournir des éléments de réponse quant à la capacité des débouchés envisagés. Il faut aussi souligner que le système ne détermine pas quelle est la meilleure filière du point de vue de l'environnement. Le choix de telle ou telle option est le reflet des priorités et des besoins locaux ou les stratégies nationales propres à chaque pays. Les systèmes fournissent des lumières à partir desquelles ces décisions et ces choix peuvent être effectués pour évoluer vers un développement durable dans la gestion des déchets ménagers. Enfin, on peut aussi identifier à partir de ces systèmes, celui qui engendre moins de fonctions inutiles c'est-à-dire moins de fonctions liées à

la production des émissions dans l'environnement entre le compostage et la décharge. L'on constate que c'est plutôt la mise en décharge qui accuse beaucoup de fonctions polluantes pour l'environnement. En effet, ces fonctions sont liées à la production des quantités importantes de biogaz et de lixiviats durant des centaines et des centaines d'années. Ces rejets affectent à la fois l'atmosphère, la lithosphère, la biosphère, bref tous les compartiments du milieu de vie.....	51
Chapitre VI. Comment adapter l'ACV aux principales filières de gestion des déchets solides et au contexte des PED ?.....	52
.....	52
1. Contexte et justification de la nécessité d'utiliser l'ACV dans les PED.....	52
Figure7 : Exemple de transfert de pollution d'une étape du cycle de vie à une autre....	53
2. De « la tombe à la réincarnation ».....	54
Figure 8 : ACV des déchets solides menée de la tombe à la réincarnation.....	55
3. Séparation des approches de responsabilité d'analyse verticale et horizontale.....	56
4. Prise en compte de la dimension sociale.....	56
Chapitre VII. Description et caractérisation des impacts environnementaux du compostage et de la décharge.....	58
1. Terminologie relative à la notion d'impact environnemental.....	58
2. Inventaire des impacts environnementaux associés au compostage.....	59
2.1. Impacts sur l'air	59
2.2. Les impacts sur l'eau et le sol	61
3. Inventaire des impacts environnementaux induits par la décharge.....	62
4. Méthodes de caractérisation des impacts environnementaux.....	65
4.1. Description des catégories.....	66
4.2. Facteurs de caractérisation.....	66
Tableau 9 : Inventaire des indicateurs d'impacts associés au compostage et au stockage des déchets ménagers : 1°) Collecte.....	67
4.3. Importance de la connaissance de l'inventaire des indicateurs d'impacts.....	69
Conclusion.....	71
Références bibliographiques.....	72

Liste des figures

Dédicaces	ii
A mon père.....	ii
A ma regrettée mère.....	ii
A mes frères et sœurs.....	ii
A tous ceux qui me sont chers.....	ii
Je dédie ce mémoire.....	ii
Résumé.....	iii
Liste des tableaux.....	vii
Liste des figures.....	xi
Liste des Sigles et abréviations.....	xv
ACV : Analyse du Cycle de Vie.....	xv
ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie.....	xv
ADSE : Association de Défense de Saint-Escobille.....	xv
AFNOR : Agence Française de Normalisation.....	xv
AGV : Acides Gras Volatils.....	xv
AHLLN : Association des Habitants de Louvain La Neuve.....	xv

ALCAN : African Life Assessment Network.....	xv
AP : Acidification Potential.....	xv
CET : Centre d'Enfouissement Technique.....	xv
CFC : Chloro-Fluoro-Carbone.....	xv
CNIID : Centre d'Information Indépendante sur les Déchets.....	xv
COT : Carbone Organique Total.....	xv
COV : Composés Organiques Volatils.....	xvi
DB : Déchets Banals.....	xvi
DBO : Demande Biologique en Oxygène.....	xvi
DCO : Demande Chimique en Oxygène.....	xvi
DD : Déchets Dangereux.....	xvi
DI : Déchets Inertes.....	xvi
DO : Déchets Organiques.....	xvi
DS : Déchets Spéciaux.....	xvi
ENSP : Ecole Nationale de la santé publique.....	xvi
EP : Eutrofication Potential.....	xvi
GCV : Gestion du Cycle de Vie.....	xvi
GWP : Global Warming Potential.....	xvi
HBFC : Hydro-Bromo-Fluoro-Carbone.....	xvi
HCFC : Hydro-Chloro-Fluoro-Carbone.....	xvi
IEPF : Institut de l'Energie et de l'Environnement de la Francophonie.....	xvi
IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change.....	xvi
ISO : Organisation Internationale de Standardisation.....	xvi
MWh : Mega-Watt-heure.....	xvi
ODP : Ozone Depletion Potentials.....	xvi
ONU : Organisation des Nations Unies.....	xvi
PCB : PolyChoro-Biphényles.....	xvi
PED : Pays En Développement.....	xvi
PNUD : Programme des Nations Unies pour le Développement.....	xvi
PNUE : Programme des Nations Unies pour l'Environnement.....	xvi
PRC : Potentiel de Rechauffement Climatique.....	xvi
Remerciements.....	xvi
Introduction.....	1
Chapitre I. Généralités sur les déchets.....	3
1.Problématique historique de la gestion des déchets.....	3
2. Concept de déchet : définitions.....	4
2.1. Conception économique.....	5
2.2. Conception sociale.....	5
2.3. Conception juridique.....	5
2.4. Conception environnementale.....	6
3. Classification.....	6
3.1. Selon l'origine.....	7
3.2. Selon la nature (Jean-Michel Balet, 2005).....	8
4. Caractéristiques des déchets ménagers solides.....	10
5. Problèmes de gestion des déchets ménagers dans les PED : flux et composition.....	11
Tableau 1 : Composition moyenne (pourcentage pondéral) des déchets ménagers dans les villes des pays en développement.....	13
Tableau 2 : Composition des déchets dans plusieurs pays (en % massique)	13
Tableau3 : Comparaison de la production et de la composition des déchets ménagers dans différents quartiers de Dakar et de Ouagadougou (en % pondéral).....	14

Chapitre II. Enjeux environnementaux associés aux filières de gestion des déchets solides ménagers.....	15
Les enjeux environnementaux associés à la gestion des déchets solides ménagers dans les pays en développement par les filières de compostage et de stockage sont extrêmement variables et hétérogènes: consommation des ressources naturelles, pollutions environnementales, perturbations environnementales, etc. Cependant, face à ces enjeux, chaque acteur impliqué dans la gestion des déchets appréhende la dimension environnementale en fonction des préoccupations prioritaires et directes et à une échelle temporelle et géographique spécifique. Les riverains d'une décharge vont par exemple se préoccuper des effets de pollutions olfactives sur la santé humaine (préoccupations directes) liés aux émissions directes (échelle temporelle) à une échelle locale (échelle géographique) sans prendre en compte les autres enjeux environnementaux, plus globaux, liés à la gestion des déchets. En bref, chacun ne perçoit et n'est sensible qu'à un nombre limité de problèmes environnementaux, essentiellement par manque de connaissance des autres problèmes.....	15
1. Consommation des ressources naturelles.....	15
2. Les pollutions environnementales.....	16
2.1. L'augmentation de l'effet de serre.....	16
1.2. Augmentation de la teneur en bio- aérosols.....	17
2.3. Les nuisances sensorielles	18
2.4. Pollution métallique et organique des eaux et des sols.....	18
3. Les perturbations	19
3.1. L'altération du paysage.....	19
3.2. L'eutrophisation des milieux aquatiques.....	19
Chapitre III : Généralités sur l'Analyse du Cycle de Vie	20
1. Concepts et définition.....	20
2. Principes méthodologiques.....	21
Figure1 : Cadre méthodologique de l'ACV.....	21
Source : ISO14040, 1997.....	21
3. Complexité méthodologique de l'ACV.....	23
4. Place de l'ACV dans la gestion des déchets ménagers solides.....	25
5. Niveau d'application des idées de l'ACV dans les PED.....	26
Chapitre IV : Fonctions remplies par les principales filières d'élimination des déchets solides dans les PED.....	27
.....	27
1. Aperçu de la situation	27
2. Le compostage.....	28
2.1. Objectifs et principes de fonctionnement.....	28
Figure 2 : Schéma simplifié du processus de compostage.....	29
2.2. Les phases du compostage.....	30
2.3. Paramètres d'optimisation du compostage.....	30
Tableau 4 : Rapport C/N de quelques matières organiques compostables.....	32
Tableau 5 : Teneurs et limites normatives en métaux lourds de différents PED.....	32
2.4. Bénéfices du compostage.....	33
Tableau6 : Teneurs (en%) en fertilisants et en métaux lourds des composts de quelques PED.....	34
3. La décharge.....	34
3.1. Rôles et principes de fonctionnement.....	34
3.2. Configuration d'un site de décharge	36
3.3. Caractéristiques quantitatives et qualitatives des lixiviats.....	37

Tableau 7 : Concentrations du lixiviat avec l'âge de l'enfouissement	38
3.4. Composition et caractéristiques du biogaz.....	38
Tableau 8 : Composition moyenne du biogaz issus des CET.....	39
3.5. Avantages de la mise en place d'un centre de stockage.....	40
Chapitre V. Etude des fonctions du compostage et de l'enfouissement au moyen de l'ACV.....	41
1. Analyse du cycle de vie co-fonctionnelle.....	41
2. Résolution du problème de l'ACVco-fonctionnelle.....	41
2.1. Prise en compte des co-fonctions simultanées sans élargir le système.....	42
2.2. Résolution par décomposition du système.....	43
2.3. Résolution sans décomposition du système.....	43
2.4. Résolution basée sur l'étude des causalités.....	44
2.5. Résolution basée sur une démarche arbitraire.....	45
3. Suivi des impacts au moyen de la construction d'un arbre des procédés.....	45
Figure 3 : Limites du système général incluant à la fois le compostage et l'enfouissement.....	47
Figure4 : Limites du sous-système de collecte des ordures ménagères.....	48
Source : Auteur.....	48
Figure5 : Limites du sous-système de compostage des ordures ménagères.....	49
Source :Auteur	49
Figure 6 : Limites du sous-système de stockage des déchets incluant les refus de tri et de compostage.....	50
5. Interprétation des systèmes.....	51
Les systèmes présentés peuvent être utilisés pour comparer des gammes de solutions en vue d'améliorer et rationaliser les procédés de traitement des déchets ménagers par compostage et enfouissement mis en place dans les pays en développement, ceux du sud en particulier. Pour chacune de ces deux filières, il est possible de prévoir la consommation d'énergie, les émissions dans les airs, dans l'eau ou le sol, le volume nécessaire à la mise en décharge des refus de traitement par compostage et même le coût global. A partir de ces systèmes, il est aussi possible de calculer les quantités de sous-produits générés par chaque sous système, tels que les matières récupérées, le compost ou l'énergie, et fournir des éléments de réponse quant à la capacité des débouchés envisagés. Il faut aussi souligner que le système ne détermine pas quelle est la meilleure filière du point de vue de l'environnement. Le choix de telle ou telle option est le reflet des priorités et des besoins locaux ou les stratégies nationales propres à chaque pays. Les systèmes fournissent des lumières à partir desquelles ces décisions et ces choix peuvent être effectués pour évoluer vers un développement durable dans la gestion des déchets ménagers. Enfin, on peut aussi identifier à partir de ces systèmes, celui qui engendre moins de fonctions inutiles c'est-à-dire moins de fonctions liées à la production des émissions dans l'environnement entre le compostage et la décharge. L'on constate que c'est plutôt la mise en décharge qui accuse beaucoup de fonctions polluantes pour l'environnement. En effet, ces fonctions sont liées à la production des quantités importantes de biogaz et de lixiviats durant des centaines et des centaines d'années. Ces rejets affectent à la fois l'atmosphère, la lithosphère, la biosphère, bref tous les compartiments du milieu de vie.....	51
Chapitre VI. Comment adapter l'ACV aux principales filières de gestion des déchets solides et au contexte des PED ?.....	52
.....	52
1. Contexte et justification de la nécessité d'utiliser l'ACV dans les PED.....	52
Figure7 : Exemple de transfert de pollution d'une étape du cycle de vie à une autre....	53

COV :	Composés Organiques Volatils
DB :	Déchets Banals
DBO :	Demande Biologique en Oxygène
DCO :	Demande Chimique en Oxygène
DD :	Déchets Dangereux
DI :	Déchets Inertes
DO :	Déchets Organiques
DS :	Déchets Spéciaux
ENSP :	Ecole Nationale de la santé publique
EP :	Eutrofication Potential
GCV :	Gestion du Cycle de Vie
GWP :	Global Warming Potential
HBFC :	Hydro-Bromo-Fluoro-Carbone
HCFC :	Hydro-Chloro-Fluoro-Carbone
IEPF :	Institut de l’Energie et de l’Environnement de la Francophonie
IPCC :	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISO :	Organisation Internationale de Standardisation
MWh :	Mega-Watt-heure
ODP :	Ozone Depletion Potentials
ONU :	Organisation des Nations Unies
PCB :	PolyChoro-Biphényles
PED :	Pays En Développement
PNUD :	Programme des Nations Unies pour le Développement
PNUE :	Programme des Nations Unies pour l’Environnement
PRC :	Potentiel de Rechauffement Climatique

Remerciements

Que Dieu le tout puissant soit loué pour m’avoir gardé en bonne santé durant mon séjour à Alexandrie et pour toutes les merveilles qu’il n’a jamais cessé de me faire jusqu’aujourd’hui.

Ce travail est le fruit du concours de plusieurs personnes tant physiques que morales, qui, par leur contribution directe ou leur soutien, m’ont aidé pour que je mène à bien ce travail. C’est à ce titre que je tiens à leur témoigner sincèrement ma reconnaissance. Je tiens en premier lieu à remercier tout particulièrement Monsieur Guy Matejka de l’Université de Limoges et Madame Caroline Gallez de l’Université Senghor, qui en dépit de leurs multiples responsabilités, ont accepté d’assurer le suivi et l’encadrement du présent travail. Leurs remarques, leurs conseils,

leurs suggestions et surtout leur rigueur scientifique m'ont été d'un apport évident. Je les remercie également, non seulement pour le temps qu'ils ont consacré à ce travail, mais aussi pour avoir contribué au renforcement de mon esprit d'initiative et de responsabilité, je leur assure de ma profonde reconnaissance. Je les remercie enfin pour leurs qualités humaines, leur disponibilité, leurs encouragements et l'intérêt qu'ils ont porté à ce mémoire.

Mes remerciements sont également adressés à l'ensemble de toutes les personnes qui ont contribué à ma formation à l'université Senghor plus particulièrement les professeurs pour m'avoir initié au travail de recherche au développement. Qu'ils trouvent ici leur entière satisfaction.

Je tiens aussi à exprimer ma reconnaissance à l'ensemble de tous mes collègues et amis de la dixième promotion de l'Université Senghor, ceux du Département Environnement en particulier, que ce soit pour les conseils et services qu'ils m'ont apportés et plus généralement pour l'amitié qu'ils m'ont témoignée durant ces deux années. Nous avons partagé nos diverses connaissances et notre expérience très enrichissante. Non seulement ils ont agrémenté mon séjour à Alexandrie, mais aussi ils m'ont permis de développer mon esprit de tolérance et d'ouverture au monde international.

Je vais en terminer en remerciant tous mes amis pour leur soutien moral et les grands moments de détente. Ne pouvant tous les nommer, ils se reconnaîtront dans ces quelques lignes. Grand merci enfin à mes parents et à toute ma famille qui n'ont jamais cessé me témoigner leur soutien et leurs encouragements à distance Mille fois merci. Enfin, je ne saurais terminer cette liste, sans adresser un remerciement particulier à mon ami et co-locataire Touret Yakariat pour ces deux années passées ensemble dans la bonne humeur et le rire.

A toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail, j'exprime ma profonde gratitude.

Introduction

La problématique des déchets solides ménagers est l'un des problèmes cruciaux de la gestion de l'environnement. En effet, l'activité de gestion des déchets ménagers est souvent considérée comme un enjeu environnemental à part, alors qu'en réalité, les différents procédés de traitement, d'élimination et de transport des déchets génèrent des pollutions qui ont des effets négatifs sur l'environnement. Les difficultés organisationnelles du secteur des déchets brouillent la vision de certains gestionnaires qui, ne voyant pas toute son extension, ne lui accordent pas l'importance qu'il mérite. Actuellement, les déchets présentent plutôt pour la plupart des gens des nuisances, mais aussi des dangers ; et leur traitement ainsi que leur élimination impliquent des coûts considérables. La question du devenir des déchets se pose de plus en plus d'une façon aiguë suite à l'augmentation de leur volume et aux problématiques qui les accompagnent: la non biodégradabilité, la toxicité de certains d'entre eux, leur durée de vie et leur impact sur l'environnement. C'est la raison pour laquelle le déchet est à l'ordre du jour dans de nombreuses rencontres internationales sur l'environnement et constitue quotidiennement une préoccupation croissante des gestionnaires de la ville et l'environnement. Cependant, la question des déchets ne se présente pas partout avec la même gravité. Si le problème est important pour les pays industrialisés, il prend des dimensions alarmantes dans les pays en développement. Alors qu'en Europe on s'est déjà rendu compte des incidences des déchets sur l'environnement et qu'en conséquence une politique de gestion stricte est en cours de développement, il n'en est pas de même en Afrique où peu est fait pour s'occuper du traitement des ordures.

Un choix optimal d'une meilleure filière de gestion est celui qui résulte d'une étude d'évaluation préalable à la fois des catégories de déchets, des quantités produites par catégorie, des avantages et surtout des externalités environnementales négatives induites par cette filière de gestion. Ce choix ne peut se faire sans outils méthodologiques adaptés. Dans la plupart des pays du sud les principales filières de gestion sont le compostage et le stockage (mise en décharge). Ainsi on se propose d'en étudier les impacts environnementaux via l'analyse du cycle de vie, outil multicritère par excellence. L'analyse du cycle de vie, développée à l'origine pour étudier l'impact environnemental des produits, est maintenant appliquée à des services comme la collecte et le traitement des déchets. Toutefois, ce type d'application reste peu fréquent et particulier. Cet outil est complexe, mais il se révèle désormais plus performant et très utile pour identifier et quantifier les conséquences environnementales des choix de gestion. Il faut savoir qu'il existe beaucoup de méthodes d'évaluation des impacts environnementaux liés aux pratiques de gestion et de traitement des déchets ménagers mais l'analyse du cycle de vie semble être la mieux indiquée car elle fait appel à une approche holistique qui consiste à définir le système du produit et à en étudier les interactions du berceau à la tombe du produit. La

démarche à adopter est rigoureusement décrite dans les normes ISO. Toutes les consommations et les rejets de produits analysés sont pris en compte. L'analyse du cycle de vie environnementale est un outil d'analyse qui permet de vérifier si les bénéfices environnementaux ne pourraient pas être obtenus à travers un changement dans le système de produit qui dans notre cas est le service de traitement des déchets urbains (Barton et al, 1996). Il semblerait qu'aucune ACV de la gestion des déchets ménagers dans les PED n'ait encore été faite, d'où l'intérêt de cette étude. Aussi la finalité essentielle de cette étude est de contribuer à la « calibration » de la méthodologie de l'Analyse de Cycle Vie par rapport au traitement des déchets ménagers par les filières compostage et de mise en stockage dans les PED. Pour atteindre cet objectif, on s'est fixé un certain nombre d'objectifs spécifiques à savoir :

1° Suivre tout en ciblant au mieux les paramètres les plus pertinents sur les centres de compostage et de stockage des déchets ménagers pour une meilleure caractérisation ultérieure des impacts environnementaux associés à ces filières.

2° Identifier tous les flux entrants et sortants ainsi que les impacts associés aux différentes fonctions remplies par le service de traitement des déchets ménagers pour chacune de ces deux filières, en vue d'en déceler des solutions envisageables et des axes concrets d'amélioration.

3° Recenser au moyen de l'Analyse du Cycle de Vie (ACV), l'ensemble des sources d'émissions potentielles d'agents chimiques et, dans la mesure du possible, physiques et biologiques, associées au traitement des ordures ménagères par compostage et mise en décharge et ayant un potentiel d'effets indésirables pour l'environnement.

4° Réaliser la synthèse des acquis scientifiques sur les risques sanitaires liés à l'exposition aux bioaérosols et aux autres polluants générés par le compostage et la mise en décharge.

On espère enfin que cette démarche pourra aider les gestionnaires de déchets ménagers des PED à améliorer leurs pratiques actuelles de gestion des déchets ménagers en utilisant les nouveaux outils d'analyse environnementale dont l'ACV afin d'optimiser et rationaliser les aspects environnementaux de leur gestion et dans une logique de développement durable en intégrant les spécificités propres à leur situation.

Chapitre I. Généralités sur les déchets

1. Problématique historique de la gestion des déchets

L'activité humaine a, de tout temps et en tous lieux, été génératrice de déchets et ces derniers ont toujours suscité des craintes surtout au point de vue hygiénique, sociétal et environnemental en général. Au niveau des écosystèmes, les déchets sont recyclés dans les grands cycles biogéochimiques de même que toute matière selon des échelles de temps parfois très longues. Parfaitement intégrés, ces cycles tournent depuis des millions d'années, leurs changements s'observent sur des intervalles de temps qui rendent l'existence humaine une fraction de rien. La participation humaine dans l'histoire de la terre est relativement courte, néanmoins, elle contribue significativement en termes d'impacts environnementaux.

Aujourd'hui, la nature ne sait plus traiter à elle toute seule, tous les déchets produits par l'homme. Toutefois, selon l'expression « les résidus des uns font le bonheur des autres », ce qui subsiste des déchets de nos ancêtres préhistoriques fait aujourd'hui le bonheur des archéologues, car c'est sur les déchets solides de nos ancêtres qu'ils ont pu tracer leurs vies, leurs coutumes, connaître leurs sociétés. Les premiers groupes identifiés à l'humanité se déplaçaient cherchant le gibier, mais leurs déchets (plutôt des restes de nourriture) ne posaient aucun problème car le peuplement était alors peu important et l'incidence sur l'environnement mineure. Quand les communautés humaines commencèrent à se sédentariser, l'accumulation des déchets dérange : l'on peut imaginer les pestilences, les animaux (macro et microscopiques) attirés par ces restes de nourriture. C'est ainsi qu'on commença alors à s'interroger sur la façon dont on peut se débarrasser des déchets sans engendrer davantage de nuisances. Chaque époque a eu son mode de traitement des déchets et ses problèmes spécifiques. C'est ainsi que les Romains par exemple mirent en place dans la plupart de leurs villes des systèmes d'égouts, comme le *Cloaca Maxima* de Rome, qui était un embryon de traitement de déchets, au moins pour les rues puisque l'ensemble était finalement déversé dans le Tibre. Pourtant l'observation de certaines pratiques historiques montre que malgré une évolution dont les générations ultérieures auraient pu hériter, les ordures ménagères du Moyen-Âge étaient simplement jetées hors des maisons, dans la rue, et éventuellement dans la rivière. Les villes et les bourgs par exemple continuaient à vivre avec leurs déchets (les récits sont assez nombreux et connus), refusant les mesures coercitives que les autorités voulaient. A cette époque, comme ces ordures étaient dans leur immense majorité biodégradables et surtout putrescibles, elles attiraient en ville toutes sortes d'agents pathogènes, une multitude de vermines et un cortège de maladies. On sait que par exemple que ce manque d'hygiène, favorisant la prolifération des rats, a eu sa grande part de responsabilité dans la propagation de nombreuses épidémies meurtrières, comme

la grande peste de 1348 qui décima près d'un tiers de la population française d'alors. Ce n'est qu'avec le courant hygiéniste du 19^{ième} siècle que les enchaînements des causes et des effets furent identifiés.

Donc, collecter les déchets est une préoccupation assez récente à l'échelle de l'humanité. C'est vers les années 1884 qu'Eugène René Poubelle, Préfet de la Seine, obligea les Parisiens à déposer leurs détritrus dans un récipient qui immortalisera son nom. La collecte traditionnelle était née. Mais, en réalité, la prise de conscience de la pollution générée par les déchets a commencé à se manifester dans les années 60 suite à la croissance exponentielle de leur production (qu'est-ce qu'on fait avec eux) et aux critiques par rapport aux tendances gaspilleuses de nos sociétés à la démographie croissante, pour lesquelles la consommation démesurée est un signe de progrès alors que la vision des ressources naturelles inépuisables est évidemment inappropriée pour la gestion des déchets. En outre la question relative à la gestion des déchets est exacerbée avec le développement de la vie urbaine. En effet, quand les hommes se concentrent sur un espace construit qui s'éloigne des champs au fur et à mesure de l'extension des villes, le cycle d'auto - élimination des ordures par compostage, non enfouissement, brûlage ou alimentation des bêtes est rompu. Aujourd'hui, faute d'une organisation efficace, les villes des pays en développement sont envahies d'immondices. Ce qui n'est enlevé soit par les chiffonniers ou les animaux qui déambulent dans les rues, ni entassé aux confins des cités, s'accumule et s'incorpore peu à peu au sol. Quand les villes s'étendent, elles intègrent les monticules de déchets des générations précédentes.

2. Concept de déchet : définitions

Etymologiquement, le mot « déchet » vient de déchoir, du latin « cadere », qui signifie tomber. La racine "dis" traduit l'éloignement et la séparation. Selon l'article L.541-1 (loi n° 2003-591 du 2 juillet 2003) du code de l'environnement français, est appelé déchet tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon ».

Actuellement, la définition du déchet n'est pas totalement acceptée par tous car elle suscite beaucoup de questions selon les époques, les lieux et les utilisateurs : Quand est ce qu'un objet devient un déchet ? Quand cesse t-il de l'être ? Un objet devient – il un déchet dès qu'il a perdu sa valeur d'usage ? La notion de déchet reste relative aux pratiques sociales, de consommation et de rejet. C'est ainsi que certains auteurs vont même un peu plus loin et abordent la notion de déchet de façon économique, sociale, juridique et environnementale, en fonction de sa nature chimique, etc (LUCIEN YVES MAYSTRE et al., 1994 ; PICHAT, 1995 ; MAYSTRE et al., 1994) :

2.1. Conception économique

Du point de vue économique, un déchet est une matière ou un objet qui n'a, à priori, aucune valeur marchande, c'est-à-dire dont la valeur économique est nulle ou négative, pour son détenteur, à un moment donné et dans un lieu donné. L'utilisation future par des tiers de la substance dont le détenteur n'a plus l'utilité ne change en rien la qualification de déchet. A partir du moment où le détenteur s'est défait d'une substance, cette substance constitue un déchet pour lui et pour les autres, tiers. Toutefois, si pour s'en débarrasser, le détenteur paie quelqu'un ou fait lui-même le travail, alors le déchet devient synonyme d'un bien ayant une certaine valeur économique car son détenteur est disposé à payer un prix pour s'en débarrasser.

Dans ce contexte, la notion de déchet est relative parce qu'un objet considéré comme tel en un lieu et à une période donnée peut ne pas l'être sous d'autres cieux. Les vieux habits ou «friperies» des populations des pays développés sont importés dans les pays du sud en général et notamment en Afrique où les marchands de friperies du secteur informel ont provoqué la faillite de plusieurs entrepreneurs du secteur du textile. En plus du temps et du lieu, la quantité peut aussi être un critère : un ballot de vieux papiers imprimés pour lequel un acquéreur paie un prix n'est pas un déchet mais plutôt une matière première secondaire.

2.2. Conception sociale

Selon le dicton : « Dis moi ce que tu jettes à la poubelle et je te dirais qui tu es », sociologiquement, le déchet est le témoin d'une culture et de ses valeurs sociales. Il est le reflet du niveau social des populations et de l'espace dans lequel elles évoluent : zones rurales, urbaines, habitats collectifs, individuels. Donc, les déchets sont une production des civilisations et leur reflet puisque même la connaissance de certaines civilisations anciennes repose sur l'analyse des restes divers : par exemple, une partie des acquis de l'archéologie s'est faite à partir de l'étude des déchets des cuisines. De nos jours des spécialistes appelés « rudologues » comme Jean Gouhier de l'Université de Mans par exemple, analysent des poubelles et caractérisent ainsi les modes de vie de certaines catégories sociales.

2.3. Conception juridique

Au point de vue juridique, la qualification de déchet dépend du détenteur : c'est lui qui décide de se débarrasser d'un objet ou d'une substance. Il est donc à l'origine de la qualification d'une substance de déchet. Le comportement du détenteur peut aussi être obligatoire, effectif ou intentionnel :

- il doit s'en débarrasser : par exemple parce qu'une substance est interdite d'utilisation
- il s'en défait : il recourt aux procédés de transformation ou de valorisation

- il a l'intention de s'en défaire : des circonstances doivent montrer que même s'il stocke sur sa propriété des substances et qu'à ce titre, il ne s'en est donc pas défait, il a l'intention dans un avenir proche de le faire.

Alors, cette conception est à la fois subjective et objective. En effet, la subjectivité réside dans le fait qu'un bien ne peut être considéré comme un déchet que si son propriétaire a déjà manifesté la volonté de s'en débarrasser. Mais, tant que ce bien n'a pas encore quitté la propriété de cette personne ou l'espace qu'elle loue, cette personne peut à tout moment changer d'avis. Si le bien a été déposé sur la voie publique ou dans une poubellerie, son propriétaire a clairement manifesté sa volonté d'abandonner tout droit de propriété sur ce bien. En fait, ce qui est déposé sur la voie publique appartient au propriétaire de la voie publique. Il y a l'objectivité dans la mesure où le comportement du détenteur de déchet peut être obligatoire. Dans ce cas, un déchet devient un bien dont la gestion doit être contrôlée au profit de la protection de la santé publique et de l'environnement, indépendamment de la volonté du propriétaire et de la valeur économique de ce bien. La législation a retenu les deux conceptions du déchet car la volonté de s'en débarrasser ne suffit pas ; et la définition objective empêche le détenteur d'un bien de se soustraire à la réglementation relative aux déchets sous prétexte de sa valeur économique.

2.4. Conception environnementale

Au point de vue environnemental, les déchets sont des flux provenant des biens de production ou de consommation, eux-mêmes provenant de matières premières, aboutissant à diverses destinations (sol, atmosphère, eaux) que l'on appelle des « *puits* » selon leurs états physiques ; c'est-à-dire solides, liquides ou gazeux. Cette conception mérite d'autres précisions puisque le seul fait de se disperser dans les différents milieux ne suffit pas : il faut tenir compte des évolutions que pourront subir ces flux (lors des opérations de collecte, tri, transformation primaire, etc..) et qui leur confèrent des caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques différentes, et de ce fait, une valeur environnementale.

3. Classification

La classification des déchets n'est pas chose facile et universelle. Les déchets peuvent être classés de différentes manières selon les objectifs recherchés et selon l'intérêt des informations qui peuvent en être tirées. Leur classification s'avère souvent très pratique et parfois indispensable pour faciliter l'abord d'une question complexe relative à la gestion des déchets et notamment quand il s'agit d'optimiser le choix de leur mode de gestion que ça soit les ménages ou sur la fabrication. Les déchets peuvent être classés selon plusieurs critères mais les plus répandus sont l'origine et la nature (Jean-Michel Balet, 2005) :

3.1. Selon l'origine

1° Déchets municipaux

Ce sont les déchets dont la responsabilité de la collecte et du traitement incombe aux communes. Ces actions peuvent être menées directement par les communes ou délégués à un groupement de collectivités, après transfert de la compétence correspondante. Les déchets municipaux sont composés par :

- ➔ **les déchets ménagers** : tous les déchets provenant des activités non professionnelles des particuliers et des ménages à leur domicile auxquels s'ajoutent les déchets de jardinage, de bricolage, les encombrants, les déchets liés à l'usage de l'automobile, les déchets ménagers spéciaux (piles, peintures, vernis,...)
- ➔ **les déchets d'origine commerciale ou artisanale** assimilables aux ordures ménagères : il s'agit de déchets issus d'activités économiques telles que l'artisanat et le commerce, etc. ou d'établissements collectifs éducatifs, socioculturels et sportifs. Leurs caractéristiques et leurs quantités produites autorisent une élimination sans sujétion technique particulière et sans risque pour les personnes et l'environnement
- ➔ **les déchets de la collectivité** : ce sont les déchets provenant des espaces verts, des services de nettoyage et de l'assainissement public (boues d'épuration des eaux usées, boues de curage des égouts,...)

2° Déchets des entreprises

Il s'agit de l'ensemble de tous les déchets provenant des entreprises industrielles, commerciales et artisanales et dont l'élimination incombe normalement à l'entreprise. Ils comprennent des matériaux de nature diverse (déchets de fabrication, emballages vides, sous-produits de production, rebuts, produits obsolètes, résidus de nettoyage solide ou liquide). Précisons que parmi ces déchets industriels, il existe des déchets industriels banals et des déchets industriels spéciaux.

3° Déchets agricoles

Ce sont les déchets organiques générés directement par les activités agricoles, les industries agro-alimentaires ou par l'élevage. La spécialisation des exploitations agricoles et le développement des industries agro-alimentaires se substituant aux productions familiales en particulier dans les pays industrialisés, ont entraîné la production de déchets essentiellement organiques qui doivent être collectés, valorisés ou traités. Il y en a d'autres qui peuvent être des plastiques, des métaux, etc. Le secteur de l'agriculture présente la particularité de produire en grande partie des fermentescibles et d'en réutiliser une bonne partie lui-même (fumier ou compost). Les éleveurs sont les plus grands producteurs.

4° Déchets des activités de soins

Ils sont souvent dénommés de façon réductrice par « déchets hospitaliers ». Il s'agit de tous les déchets issus des activités de diagnostic, de suivi et de traitement préventif, curatif ou palliatif dans le domaine de la médecine humaine ou vétérinaire, des hôpitaux publics, des laboratoires médicaux d'analyses et des professions libérales de santé (encore appelés déchets diffus). Indépendamment de cette classification par origine, les déchets des activités de soins sont distingués en fonction de leur nature de la manière suivante :

- les déchets radioactifs
- les déchets toxiques, générateurs de nuisances
- les déchets assimilés aux ordures ménagères
- les déchets contaminés

3.2. Selon la nature (Jean-Michel Balet, 2005)

1° Déchets ultimes (DU)

Ce sont les résidus résultant ou non du traitement d'un déchet, qui n'est plus susceptible d'être traité dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux. Donc, les déchets ultimes sont les déchets dont on a déjà extrait la part récupérable ainsi que les divers éléments polluants.

2° Déchets Inertes (DI)

Ce sont des déchets qui ne se décomposent pas, ne brûlent pas, ne produisent aucune réaction physique, biologique ou chimique importante dans le temps, ne sont pas biodégradables et ne détériorent pas d'autres matières avec lesquelles ils entrent en contact de façon à entraîner une pollution de l'environnement ou à nuire à la santé humaine. Ils sont composés de gravats, des déchets de l'exploitation des carrières, des mines, des travaux de démolition et de construction, les déchets de verres, les tuiles et les céramiques.

3° Déchets banals (DB)

Ce sont les déchets qui par leur nature, leur composition, leurs caractéristiques sont assimilables aux déchets ménagers car ils peuvent être traités dans les mêmes installations que les ordures ménagères sans restriction d'origine puisqu'ils contiennent les mêmes composants, mais avec des proportions différentes. Ces déchets proviennent des activités économiques, commerciales, artisanales ou des établissements collectifs. Ce sont en grande partie des emballages, mais également des chutes, des copeaux, des loupés en bois, en plastique, en textile, en carton, en métal, ... ainsi que des résidus de nettoyage et de bureaux.

4° Déchets organiques (DO)

Ce sont les déchets organiques issus des déchets verts, des déchets fermentescibles, de sous-produits de l'industrie agro-alimentaire, des boues et graisses de stations d'épuration, de matières de vidange organique, des effluents d'élevage, etc. On appelle *biodéchets* un flux de déchets pouvant subir une décomposition biologique naturelle aérobie ou anaérobie, collectés sélectivement auprès d'une collectivité et qui sont destinés à une valorisation organique. Ces déchets se composent majoritairement de déchets de cuisine, les déchets de jardin, le papier et le carton.

5° Déchets flottants (DF)

Le terme « déchet flottant » regroupe tous les produits solides rebus de l'activité humaine ou pas, flottant à la surface des eaux. Une multitude de matériaux sont regroupés sous ce terme, parmi lesquels : plastiques, cordages, algues, déchets de bois, cadavres d'animaux, voire galettes de mazout.

Ces déchets possèdent des origines diverses, les principales étant les décharges non contrôlées, l'activité touristique et maritime, l'érosion. On notera qu'une partie de ces matériaux est d'origine naturelle (bois, algues,...). Ils ont deux vecteurs principaux dont les cours d'eaux et les courants marins. Leur destination commune est le littoral.

6° Déchets dangereux (DD)

Tous les déchets qui par leurs constituants ou par les caractéristiques nocives qu'ils contiennent sont susceptibles de nuire à la collectivité ou à l'environnement et dont la liste est fixée par voie réglementaire.

7° Déchets spéciaux (DS)

Cette catégorie regroupe majoritairement les déchets d'origine industrielle, mais également, des produits en plus petite quantité, certains déchets de laboratoire et de petites et moyennes entreprises (déchets toxiques en quantités dispersées), des ménages (déchets ménagers spéciaux) et du monde agricole (déchets phytosanitaires).

Ces déchets peuvent être :

- ➔ des déchets organiques tels que les hydrocarbures, les PCB, les solvants,....
- ➔ des déchets minéraux liquides tels que les acides, les bains de traitement de surface,...
- ➔ des déchets minéraux solides tels que les boues des stations d'épuration industrielle, sable de fonderie

Générateurs de nuisances, ces déchets font l'objet de précautions particulières lors de leur élimination. Certains d'entre eux, du fait de leur toxicité reconnue, sont soumis à des contrôles et à des réglementations spécifiques.

4. Caractéristiques des déchets ménagers solides

Les déchets ménagers constituant l'objet de notre travail, une description préalable, complète et détaillée de leurs caractéristiques s'avère nécessaire. On entend par déchets ménagers tous les détritiques générés par les ménages, tels que déchets de nourriture ou de préparation des repas, balayures, objets ménagers, journaux et papiers divers, emballages métalliques de petites dimensions, bouteilles, emballages papiers ou plastiques, chiffons et autres résidus textiles, etc. On y inclut également les déchets végétaux provenant de l'entretien des jardins, des cours, etc. Bien souvent, on assimile aussi aux déchets ménagers d'autres détritiques dans la mesure où ils sont de nature similaire aux déchets des ménages et produits par des individus dans des proportions relativement proches. On citera par exemple les déchets de bureaux, des commerces, de l'artisanat, des administrations, des halles, des foires, des marchés, des collectivités tels que les cantines, de l'entretien des espaces verts et des voiries ainsi que tous les objets et cadavres de petits animaux abandonnés sur la voie publique. Cette énumération exclut formellement les déchets de chantiers de construction et de travaux publics (déblais, gravats, décombres, débris, etc.) ; les déchets industriels (notamment les encombrants métalliques, les produits toxiques ou dangereux) et commerciaux ne satisfaisant pas aux critères ci-dessus ; les déchets hospitaliers et autres objets susceptibles de véhiculer des pollutions bactériologiques ou médicamenteuses ; tous les déchets qui, en raison de leur encombrement, de leur poids ou de leur nature, ne pourraient être chargés dans les véhicules de collecte.

On distingue habituellement trois fractions dans les déchets ménagers :

1°) La fraction biodégradable comprend les matières qui peuvent être dégradées par l'action de microorganismes en un laps de temps déterminé: végétaux, déchets alimentaires, fruits, fibres cellulosiques (papiers cartons) et les plastiques biodégradables (sacs en PLA= acide polylactique).

2°) La fraction inerte comprend les matières qui ne peuvent pas être dégradées par l'action de microorganismes en un laps de temps déterminé : verre, pierres, céramiques, plastiques non biodégradables, textiles synthétiques, caoutchouc, etc. Cette fraction apporte plus de nuisance que de pollution chimique.

3°) Les contaminants sont des matériaux qui relâchent des polluants chimiques toxiques (par exemple des métaux lourds) dans le milieu et qui ne sont pas ou peu biodégradables : batteries, métaux non ferreux, solvants, peintures, huiles, encres, matériaux (plâtres, etc.) contenant des sulfates pouvant former des composés acides, etc.

5. Problèmes de gestion des déchets ménagers dans les PED : flux et composition

La protection de l'environnement et l'équité sociale en matière de gestion des déchets sont difficilement conciliables dans les pays du sud. Dans beaucoup de pays en développement, les pratiques en matière de gestion des déchets solides et liquides contredisent plus encore que dans les pays industrialisés, les principes de prudence écologique et de développement durable. Ils sont loin de répondre aux besoins de l'ensemble des populations urbaines. Ces pratiques ont des impacts désastreux, à court et long terme, pour la santé des populations, les sols et les ressources, etc. La situation est particulièrement critique dans les villes où les densités élevées de population entraînent des concentrations de déchets qui compliquent encore la situation. L'urbanisation se poursuit, débordant les capacités des autorités urbaines qui ne parviennent pas à la maîtriser et à la gérer convenablement.

Il n'existe pas à l'heure actuelle d'état bien précis et exhaustif des gisements de déchets dans beaucoup de pays en développement, la majorité des pays du sud en particulier : abondance de décharges sauvages, défaut de répertoires statistiques nationaux au niveau de chaque pays, influence des nomenclatures hétérogènes venant des pays développés, difficultés de communication au sein des professionnels etc. Les statistiques officielles en matière de production et de composition des déchets ménagers dans les pays en développement sont de manière générale difficiles à obtenir et restent approximatives (elles ne distinguent pas toujours les débris de végétaux des restes de cuisine, par exemple). Elles sont bien souvent basées sur des recensements non exhaustifs de la population et l'évaluation sommaire de la quantité et de la qualité des déchets collectés. Pour être fiable, la quantification des déchets demande une organisation basée sur une collecte régulière et une pesée systématique des camions et des bennes. Or, dans certaines zones urbaines, particulièrement celles qui sont à faibles revenus, la collecte des déchets, pour autant qu'elle soit effective, n'est pas régulière, avec l'absence fréquente de pont-bascule à l'entrée des décharges, généralement non contrôlées. Selon les données qui ont pu être recueillies dans une étude publiée en 2005 par l'IEPF sur les villes des pays en développement, la production annuelle moyenne de déchets d'un habitant se situe entre 180 et 240kg. Il s'agit d'environ 1,5 à 2,5 fois moins que dans les pays industrialisés. Cependant, alors que la production de déchets est relativement semblable que l'on considère les zones urbaines ou rurales des pays industrialisés, la différence se marque davantage dans les pays en développement. En Tunisie, par exemple, la production moyenne d'ordures ménagères est de 213 kg par an par habitant, mais on observe une moyenne de l'ordre de 320 kg/hab/an pour la ville de Tunis (IEPF, 2005). Soulignons également que la production de déchets dans une même ville peut subir de grandes variations saisonnières (notamment dans les villes touristiques) ou hebdomadaires (apport massif de déchets provenant des marchés, par exemple).

La Tunisie observe un accroissement de la production de déchets domestiques de 25% en été pour les zones les moins touristiques et jusqu'à 50% dans les villes du tourisme (IEPF, 2005). Quelles qu'en soient les raisons, les déchets restent un peu dans l'ombre, ou au mieux un peu dans le flou. Leur enlèvement et leur élimination souffrent de multiples contraintes dont l'insuffisance de voies de desserte et l'allongement des distances de collecte suite à l'extension des périmètres urbains, la modicité et la faiblesse du taux de recouvrement de la taxe d'enlèvement des ordures, l'absence de textes juridiques réglementant la pré – collecte et la multiplicité des intervenants sans cahiers des charges précis dans le secteur.

Aujourd'hui, faute d'une organisation efficace, nombreuses sont les villes africaines qui sont envahies d'immondices. Les autres problèmes de collecte des déchets dans les pays du sud sont associés aux difficultés de financement des collectivités locales pour investir dans les équipements de collecte et transport de déchets ménagers. Ces équipements sont dans la plupart des cas importés à partir des pays industrialisés, ce qui rend les coûts plus chers. Ce qui fait que les volumes de déchets collectés restent toujours faibles, surtout en raison des problèmes liés parfois au manque de véhicules adéquats pour le transport vers les centres de traitement. La collecte et l'élimination des déchets solides dans les villes des pays en développement constituent la plus grande difficulté que rencontrent les autorités municipales. En effet, il suffit de faire quelques pas dans les rues des grandes villes pour rencontrer une kyrielle de dépotoirs. Même les voies les plus achalandées n'échappent pas à cette dure réalité.

Dans certains de ces pays, les tas d'immondices ne sont pas régulièrement ramassés, ou bien le système de gestion des déchets ménagers consiste à rassembler tous les déchets, à les collecter et à les mettre en décharge sauvage dans des zones éloignées des villes et laisser enfin la nature s'occuper de leur traitement. Ainsi le problème est que les déchets quittant les ménages sont stockés sur des sites de grandes superficies et certains d'entre eux sont potentiellement dangereux pour l'eau, pour l'air, le sol, les animaux, les végétaux, les populations environnantes et pour l'environnement en général ; ce qui donne lieu à des transferts de pollution entre les milieux.

Enfin, pour la plupart des pays en développement, il semble que la question de gestion des déchets est dominée par les préoccupations quotidiennes de survie. Dans la plupart de ces villes des PED, où la disposition finale des déchets n'est pas précise, il y a toujours des fouilleurs. Pour eux, les déchets ont une valeur positive même si le binôme quantité/qualité ne justifie pas localement la viabilité économique, générant de revenus hors du marché formel du travail. En ce qui concerne la composition des déchets, le tableau 1 permet de se donner une idée des proportions pondérales moyennes.

Tableau 1 : Composition moyenne (pourcentage pondéral) des déchets ménagers dans les villes des pays en développement.

Matière organique	Papiers cartons	Chiffons	Métaux	Plastiques	Verre, os	Inertes
40-55	5-10	2-4	2-4	2-11	1-3	15-40

Source : IEPF, 2005

On constate que c'est plutôt la présence des fractions importantes d'inertes et de matières organiques qui les différencie des pays industrialisés. La fraction d'inertes comprend les fines particules de sable, gravier, etc., qui proviennent du nettoyage des légumes et du balayage des maisons (particules qui se séparent du sol pas toujours couvert d'un carrelage ou ramenées des routes non revêtues). Remarquons que les plastiques représentent une faible proportion pondérale des déchets alors que le volume qu'ils occupent est relativement important, tout comme la proportion de métaux potentiellement polluants. Toutefois, la composition des déchets solides dans les PED varie d'un pays à l'autre et même d'un quartier à l'autre. Le tableau suivant en donne quelques exemples :

Tableau 2 : Composition des déchets dans plusieurs pays (en % massique)

Pays	Fermentescibles	Verres	Plastiques	Papiers cartons	Métaux
Bénin	45	-	3-4	-	-
Burkina Faso	39	3	10	9	4
Egypte	60	2,5	1,5	13	3
Guinée	69	0,3	22,8(+ textiles)	4,1	1,4
Ile Maurice	68	1	13	12	1
Maroc	65-70	0,5-1	2-3	18-20	5,6
Mauritanie	4,8	3,8	20	3,6	4,2
Tunisie	68	2	7	11	4
Allemagne	15	9	3	27,5	6,5
USA	23,8	5,9	9,4	38,5	7,7
France	29	13	11	25	5
Japon	30	7-13	8-10	40-42	47,5
Grèce	45	4	11	22	4,5

Source : Informations tirées de la thèse de Florence Charnay, 2005

Encore une fois, ce tableau montre que la fraction fermentescible est surtout dominante dans les PED que dans les pays industrialisés. A l'inverse, la part des papiers et de matières plastiques s'accroît dans les pays industrialisés, reflétant ainsi les nouveaux modes de vie des populations. Comme pour la production des ordures ménagères, il existe des variations importantes entre composition des déchets des zones rurales et des zones urbaines, et même en fonction du niveau de vie des populations, des villes des pays en développement. Le

tableau 3 présente une comparaison entre zones de niveaux de vie différents dans les agglomérations de Dakar et de Ouagadougou :

Tableau3 : Comparaison de la production et de la composition des déchets ménagers dans différents quartiers de Dakar et de Ouagadougou (en % pondéral)

Sénégal, Dakar					Burkina Faso, Ouagadougou		
	Plateau	Grand Dakar	Pikine	Rufisque	Haut standing	Moyen standing	Bas standing
Matière organique	58,9	47,5	37,2	35,2	60	37	21
Papiers, cartons	23,1	7,1	5,2	6,1	13	11	3
Chiffons	2,4	3,7	3,5	6,1			
Métaux	3,9	3,3	1,8	3,1			
Plastiques	5,2	3,5	3,1	4,4			
Verre, os	2	7,5	11,7	12,7			
Inertes (sable, gravier)	4,5	27,4	37,5	32,4	27	52	76
Production (Kg/hab/an)	220		156	103	310	237	197
Population (en 1996)	822000		946000	141000			
Densité (hab/Km ³)	9960		10230	6430			

Note: De gauche à droite: quartiers de niveau de vie décroissant

Sources: Decq et al, 1991; Direction de la Statistique, Dakar 1996; Direction de l'Énergie, Dakar, janvier 1999; PNUD, 1994.

Ces comparaisons entre quartiers ou villes montrent que la composition et la production des déchets sont associées au niveau de vie des populations qui les génèrent. De plus, les habitudes de vie de certaines grandes villes africaines semblent se rapprocher de plus en plus des villes actuelles européennes témoignant d'un niveau de consommation similaire. En conséquence, pour ces villes de près, ou plus, d'un million d'habitants, les moyens de collecte à mettre en oeuvre se rapprocheront de ceux qui sont utilisés dans les pays industrialisés.

Chapitre II. Enjeux environnementaux associés aux filières de gestion des déchets solides ménagers

Les enjeux environnementaux associés à la gestion des déchets solides ménagers dans les pays en développement par les filières de compostage et de stockage sont extrêmement variables et hétérogènes: consommation des ressources naturelles, pollutions environnementales, perturbations environnementales, etc. Cependant, face à ces enjeux, chaque acteur impliqué dans la gestion des déchets appréhende la dimension environnementale en fonction des préoccupations prioritaires et directes et à une échelle temporelle et géographique spécifique. Les riverains d'une décharge vont par exemple se préoccuper des effets de pollutions olfactives sur la santé humaine (préoccupations directes) liés aux émissions directes (échelle temporelle) à une échelle locale (échelle géographique) sans prendre en compte les autres enjeux environnementaux, plus globaux, liés à la gestion des déchets. En bref, chacun ne perçoit et n'est sensible qu'à un nombre limité de problèmes environnementaux, essentiellement par manque de connaissance des autres problèmes.

1. Consommation des ressources naturelles

N'importe quelle filière de gestion des déchets ménagers pose un problème environnemental dans la mesure où elle entraîne au même titre que toute activité économique la consommation et la diminution des ressources naturelles disponibles. A court, à moyen ou à long terme, nous ne pouvons pas écarter l'hypothèse d'une éventuelle pénurie. Cela concerne surtout les ressources naturelles non renouvelables disponibles en quantité limitée (matières minérales, énergie des ressources fossiles ou hydroélectrique). Une ressource naturelle est considérée comme une ressource non renouvelable si sa période de formation dépasse de loin la durée du cycle de vie de l'homme ou si elle ne se régénère pas dans des délais qui lui permettent d'être exploitée continuellement. Cet épuisement touche aussi les ressources naturelles renouvelables car le taux de leur utilisation ou de leur extraction risque d'être supérieur à leur taux de régénération. Cet épuisement peut être provoqué par trois facteurs :

- *La rareté d'origine structurelle* : certaines ressources utilisées ne sont disponibles qu'en quantité limitée par rapport à une demande raisonnable.
- *La rareté provoquée par « l'offre »* : la dégradation de l'environnement entraîne la raréfaction d'une ressource particulière la rendant moins accessible à chaque individu (exemple, le rejet des polluants acides dans le sol contribue à la diminution des cations nutritifs et entraîne une baisse de la productivité agricole).
- *La rareté provoquée par la demande* : c'est une raréfaction des ressources naturelles accessibles à chaque personne suite à l'accroissement démographique ou à la hausse des

niveaux de consommation aboutissant par conséquent à la production d'un volume important de déchets à traiter.

Au point de vue chimique, on peut dire que dans la plupart des cas, il ne s'agit pas à proprement parler de disparition de ressources dans la mesure où les atomes constituant ces ressources ne disparaissent pas, mais plutôt de ressources rendues inutilisables à cause de leur dispersion ou leur transformation. Le problème peut aussi concerner l'ensemble des ressources qui ne sont pas épuisables mais pour lesquelles existe un flux maximal disponible. On range « l'espace et l'énergie solaire ou hydroélectrique » dans cette catégorie. En effet, nous disposerons, toujours du même volume d'atmosphère ou d'eau, de la même surface sur la terre, à moins d'imaginer une modification grave de la planète. En revanche, l'utilisation qui est faite de ces espaces par des êtres humains pourra les rendre indisponibles à d'autres. Le soleil continuera à arriver sur la terre et l'eau continuera à couler dans le futur. Notons que l'utilisation de l'espace et de l'énergie n'a, a priori, que des répercussions locales du moins si l'on ne prend en compte que les effets du premier ordre, alors que les émissions de matières sont responsables de problèmes aussi bien au niveau local que régional ou global.

2. Les pollutions environnementales

Les pollutions environnementales sont des dégradations de la qualité de l'*environnement* directement liées aux émissions de matières, d'énergies et aux restitutions d'espaces dégradés. Les conséquences directement liées à ces différentes émissions physiques sont l'effet de serre, la destruction de la couche d'ozone stratosphérique, l'écotoxicité (métaux lourds), l'acidification des milieux, émissions des poussières (bio-aérosols), l'eutrophisation, etc.

2.1. L'augmentation de l'effet de serre

a) les causes principales

Les augmentations des émissions des gaz à effet de serre sont principalement dues aux émissions de CO₂ lors de la combustion des hydrocarbures dans les véhicules durant les opérations de transport des déchets vers les centres de traitement, lors de la fermentation dans les centres de compostage ainsi que lors de la combustion du biogaz dans les torchères au niveau des décharges. L'effet de serre est aussi dû aux émissions de CH₄ dans les décharges.

Les émissions de gaz dans les centres de compostage et de décharge à se classent en deux catégories :

- gaz à effet direct : la vapeur d'eau (H₂O), le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), le protoxyde d'azote (N₂O)
- gaz à effet indirect : plusieurs gaz chimiquement réactifs, notamment les oxydes d'azote (NO_x), monoxyde de carbone (CO) et les composés organiques volatils (COV) jouent

également le rôle de gaz à effet de serre indirect en raison de l'influence qu'ils exercent non seulement sur la production d'ozone, mais aussi sur la destruction du CH₄ et d'autres gaz à effet de serre. En effet, le *monoxyde carbone* est un gaz à effet de serre indirect qui s'oxyde progressivement en CO₂. Le CO entraîne une augmentation de l'ozone troposphérique en combinaison avec le N₂O et les COV.

b) les effets potentiels liés à l'effet de serre

La conséquence directe de l'augmentation de l'effet de serre est l'augmentation de la température moyenne à la surface du globe. Les scientifiques estiment que, depuis la fin XIX^e siècle, la température moyenne a augmenté de 0,6°C à plus ou moins 0,2°C (IPCC, 2001). De plus, tout facteur qui modifie le rayonnement solaire ou celui qui est renvoyé dans l'espace, ou encore qui modifie la redistribution de l'énergie dans l'atmosphère ou entre l'atmosphère, les terres émergées et les océans, va influencer sur le climat. Les perturbations observées du système climatique et reprises dans le rapport de l'IPCC : « *Bilan 2001 des changements climatiques* » sont :

- Diminution de l'enneigement et de l'étendue des glaces terrestres
- Augmentation du niveau de la mer
- Augmentation des précipitations et de l'humidité atmosphérique
- Changement de la circulation atmosphérique et de la circulation des courants marins
- Variabilité du climat et des phénomènes météorologiques et climatiques extrêmes

c) Liens avec d'autres enjeux environnementaux

L'augmentation de l'effet de serre accélère l'appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique. Les scénarios du réchauffement planétaire prévoient des températures plus hautes au niveau de la troposphère mais plus basses au niveau de la stratosphère, donc plus de nuages stratosphériques polaires et davantage de chlore actif (Cl) dans la région du trou d'ozone (O₃).

1.2. Augmentation de la teneur en bio- aérosols

Les bio-aérosols sont des particules de poussières microscopiques suspendus, émises lors des opérations d'affinage du compost dans les centres de compostage, et présentent des effets néfastes sur la santé des travailleurs. Cependant, leur émission dans la stratosphère entraîne un forçage radiatif négatif (diminution de la température à la surface du globe) en renvoyant une partie des rayons du soleil dans l'espace. L'amplitude de cet effet de refroidissement dépend de la composition et de la taille des particules. Outre leur forçage radiatif direct, les bio-aérosols ont un forçage radiatif indirect en agissant comme noyau de condensation pour la formation de nuages ou la modification des propriétés optiques et de la durée de vie des nuages. Il existe

aujourd'hui davantage d'éléments de preuve de l'existence de cet effet indirect, qui est négatif, mais l'ampleur reste incertaine car le forçage indirect dû aux bio-aérosols troposphériques est mal connu.

2.3. Les nuisances sensorielles

Ce sont des pollutions correspondant aux dégradations de la santé des êtres vivants. Ces pollutions sont le plus souvent des effets d'ordres supérieurs, c'est à dire des conséquences d'autres problèmes environnementaux. Le « *bruit* » est placé au premier rang des nuisances de la vie quotidienne. Le bruit agit sur le système auditif et peut causer la surdité totale ou partielle. Le bruit est également un agent stressant, impliqué dans l'apparition de nombreux troubles tels que vertiges, effets cardiovasculaires, nausées, fatigabilité excessive, irritabilité. Les sources du bruit associé aux systèmes de gestion des déchets ménagers par compostage et mise en décharge sont multiples et ses perceptions diffèrent selon les lieux et les personnes. La nocivité est en fonction de l'intensité, la durée, la répétition et l'horaire d'émission.

Tout comme le bruit, il existe une grande imprécision quant la sensation de l'intensité de « *l'odeur* » et la sensibilité des individus est variable. On a souvent du mal à distinguer ce qui relève de l'odeur et ce qui relève de la saveur. Parmi les composés odorants, le plus connu est H₂S qui dégage une odeur semblable aux œufs pourris. Les problèmes d'odeurs sont responsables de désagrément aux riverains mais peuvent également être annonciateurs d'un risque pour la santé humaine.

2.4. Pollution métallique et organique des eaux et des sols

La pollution métallique est due aux métaux lourds contenus dans les lixiviats produits les décharges. Cependant, les teneurs en métaux lourds sont moins dramatiques que l'on croit ; les métaux lourds restent piégés dans les décharges sous forme de sulfures. Les matières organiques contenues dans les lixiviats peuvent être responsables de la pollution organique des milieux aquatiques lorsque ceux-ci sont rejetés sans traitement préalables. Certaines substances organiques sont facilement biodégradables et peuvent être décomposées et éliminées grâce aux capacités naturelles d'autoépuration. Toutefois, lorsqu'elles sont en excès, leur décomposition peut entraîner l'asphyxie de la faune aquatique. Ce sont les poissons qui souffrent le plus du manque d'oxygène, les invertébrés étant les moins affectés, et les bactéries encore moins. En cas de forte pollution, la vie végétale tend à disparaître. La pollution organique peut aussi être due aux rejets des hydrocarbures dans l'eau. En effet, bien qu'ils soient biodégradables, les hydrocarbures peuvent avoir des effets toxiques importants sur la flore et la faune aquatiques (principalement les oiseaux et les mammifères marins) lorsqu'ils sont présents en grande

quantités. Les lixiviats peuvent être responsables de la pollution microbiologique du fait qu'ils contiennent des germes pathogènes comme des virus, des bactéries ou d'autres parasites.

3. Les perturbations

Il s'agit des perturbations correspondant aux dégradations des milieux de vie ou biotopes. Les effets sur la nature comprennent l'altération du paysage, l'eutrophisation des milieux aquatiques, pollution métallique et organique des eaux et des sols, etc.

3.1. L'altération du paysage

L'altération du paysage due à des modifications physiques des espaces dans lesquels on aménage les centres de mise en décharge des déchets par exemple, peut avoir un effet direct sur la qualité de vie des habitants et entraîner des retombées économiques négatives comme la baisse des visites touristiques et de la valeur vénale des terrains.

3.2. L'eutrophisation des milieux aquatiques

L'eutrophisation est définie comme un déséquilibre d'un écosystème dû à un excès de nutriments et de matières organiques biodégradables, qui se traduit par une croissance excessive des algues et une diminution de l'oxygène dissout. Ces nutriments sont principalement les phosphates et les nitrates, mais aussi l'ammoniac issu de la décomposition des effluents organiques par les bactéries aérobies dans les centres du compostage. On observe alors une différence de plus en plus marquée entre les eaux proches de la surface, très oxygénées, et les eaux profondes, totalement désoxygénées et non éclairées, car la prolifération des algues en surface empêche toute pénétration de lumière. Par conséquent, les certaines espèces animales aquatiques telles que les poissons et les bactéries aérobies meurent par asphyxie. Au bout d'un certain temps, seules les bactéries anaérobies vont survivre dans ce milieu dépourvu d'oxygène. Elles se multiplient et provoquent la fermentation de toute matière organique accumulée, libérant des gaz nauséabonds (hydrogène sulfuré et ammoniac) et du méthane. Une autre conséquence de l'eutrophisation est le développement d'algues toxiques ayant un effet sur la santé humaine, la faune ou la flore.

Chapitre III : Généralités sur l'Analyse du Cycle de Vie

1. Concepts et définition

Les attentes en matière de respect de l'environnement et du cadre de vie sont aujourd'hui exprimées de plus en plus par tous les secteurs sociaux et économiques. Cette prise de conscience se traduit en particulier par un souci constant de réduction des impacts sur l'environnement des activités industrielles ou des services. C'est dans ce contexte qu'a été développée l'analyse du cycle de vie. L'idée à la base de la création et de la mise en place de cet outil consiste à inciter à agir désormais non plus seulement de façon curative, comme c'était souvent le cas par le passé, mais également de façon préventive car le développement durable impose une nouvelle philosophie de production et de consommation. Poursuivant cet objectif, le Sommet mondial pour le développement durable, tenu sous les auspices de l'ONU à Johannesburg en août 2002, a proposé l'adoption d'un plan de travail sur dix ans visant à changer les modèles de consommation et de production non durables. Parmi les moyens proposés se trouve la prise d'actions en amont plutôt qu'en aval des problèmes environnementaux, en stimulant une économie basée sur une nouvelle philosophie : la « pensée du cycle de vie ».

La pensée du cycle de vie est un nouveau concept qui s'inscrit parfaitement dans le cadre du développement durable. En effet, il s'agit d'une philosophie de production et de consommation qui vise la prise en compte de toutes les relations (environnementales, économiques et sociales) propres à un produit ou à un service, depuis l'extraction de matières premières jusqu'à l'élimination finale, afin d'en réduire l'impact négatif sur l'environnement et la société. Ce concept s'appuie sur un « coffre à outils » appelé « gestion du cycle de vie » (GCV), lequel contient des outils dont, entre autres, « l'analyse du cycle de vie » (ACV) des produits et services. Dans le cadre du présent travail, on s'attardera principalement à faire l'étude de la démarche méthodologique de l'ACV applicable à la gestion des déchets ménagers solides.

Par le fait de considérer le cycle de vie d'une action, les effets tant directs qu'indirects sont pris en compte, permettant ainsi une évaluation plus fidèle de son incidence réelle. Par exemple, si un procédé de traitement des déchets consomme des intrants (matières, énergie), l'ACV prend en compte les émissions et les consommations de ressources qui auront été nécessaires pour la production de ces intrants et leur acheminement vers les sites. De même si le procédé génère des sous-produits (compost, énergie), l'ACV prend en compte les conséquences de leur valorisation : émissions et consommations supplémentaires et/ou émissions et consommations évitées grâce aux substitutions que permet la valorisation. Par exemple la valorisation agricole du compost consomme de l'énergie pour l'épandage, mais permet d'éviter la production, l'acheminement et l'épandage d'une quantité de fertilisants minéraux. L'analyse du cycle de vie

ou bilan écologique est une méthode d'évaluation des impacts sur l'environnement et sur les ressources naturelles d'un produit, d'un service ou d'une activité, de l'extraction des ressources naturelles jusqu'à l'élimination des déchets, dont le produit en fin de vie. L'objectif de l'ACV est principalement l'observation de différents systèmes en vue de minimiser les impacts environnementaux. Egalement appelée «écobilan», cette analyse est un bilan détaillé et quantitatif des entrées et des sorties mesurées aux frontières d'un système préalablement défini. En termes simples, il s'agit de dresser un bilan des matières et de l'énergie utilisées durant tout le cycle de vie d'un produit ou d'un service et de faire de même en ce qui concerne les impacts. Il faut enfin noter que les ACV concernent une fonction donnée et n'ont pas pour objectif de remettre en cause cette fonction. On peut comparer par exemple les sacs plastiques sans imaginer la possibilité de ne pas utiliser de sac.

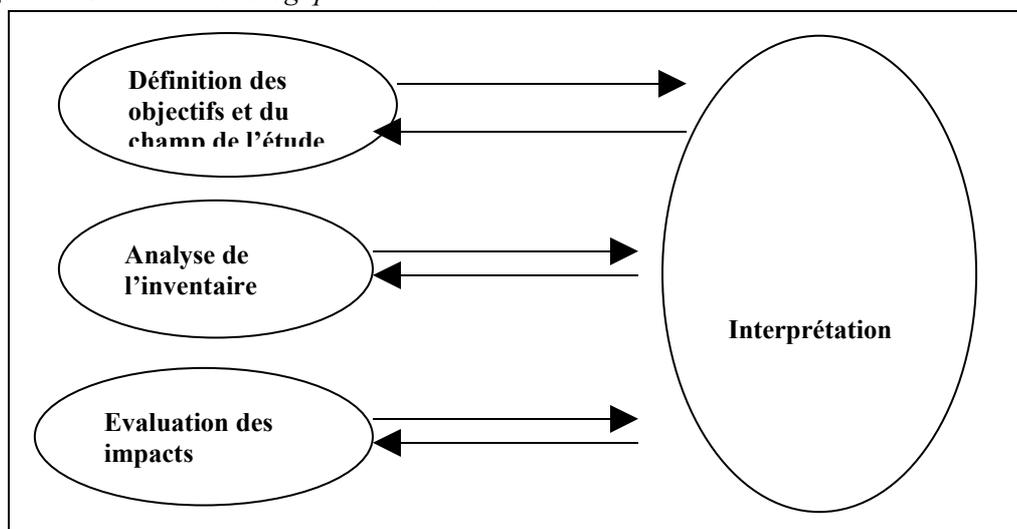
2. Principes méthodologiques

Régie par les normes de la série ISO 14040, l'Analyse du Cycle de Vie est une approche rigoureuse dont les normes de conduite sont :

- 1° ISO 14040 : Principes et cadre
- 2° ISO 14041 : Définition de l'objectif et du champ de l'étude et analyse de l'inventaire
- 3° ISO 14042 : Etude du cycle de vie
- 4° ISO 14043 : Guide d'interprétation
- 5° ISO 14044 : Amélioration du cycle de vie

Selon la norme ISO, la méthodologie d'une étude d'analyse du cycle de vie comporte quatre phases distinctes: la définition des objectifs et du champ de l'étude, l'analyse de l'inventaire, l'évaluation des impacts et la phase d'interprétation. Le processus est schématisé par le graphique suivant :

Figure 1 : Cadre méthodologique de l'ACV



Source : ISO14040, 1997

La première phase, soit la définition des objectifs et du champ de l'étude, a pour but de déterminer les objectifs de l'étude et de circonscrire les limites du champ d'étude, que l'on appellera ici « système ». Un point important de cette phase consiste à définir « l'unité fonctionnelle » à la base de l'étude. Cette unité permet de comparer différents produits rendant un service similaire. Elle est définie avec précision à partir de l'objectif de l'étude, de son utilisation et de l'usage des produits. Elle permet de prendre en compte à la fois une unité de produit et une unité de fonction. En somme, cette première étape doit répondre, entre autres, aux questions suivantes :

- À quoi servira l'ACV?
- À une comparaison de produits ou de services?
- À améliorer un produit, un service ou un procédé existant ?
- À mettre en place une politique publique?
- Qui utilisera les résultats de l'étude?

La deuxième étape, l'analyse de l'inventaire, consiste à quantifier tous les flux entrants (matières premières, énergie, etc.) et sortants (rejets, émissions, etc.) du système à étudier, à l'aide de bases de données très détaillées. C'est l'étape la plus longue et la plus fastidieuse dans une ACV. Ces bases de données sont issues de sources privées, gouvernementales et universitaires. Certaines de ces bases sont disponibles à même les logiciels commerciaux d'analyse du cycle de vie, dont les plus utilisés sont: GaBi (PE Europe GMBH, Allemagne); SimaPro (Pré Consultants, Pays-Bas) ; TEAM (Éco-Balance, France-USA); Umberto (ifu, Allemagne); KCLECO (KCL, Finlande). Cette deuxième phase de l'ACV permet, entre autres, de répondre aux questions suivantes :

- Quelle quantité d'énergie est requise pour produire, distribuer et disposer du produit?
- Quelles substances sont consommées durant les étapes de la vie du produit ?
- Quels sont les co-produits, déchets et polluants émis dans l'environnement (eau, air et sol) ?

La troisième étape consiste à évaluer qualitativement et quantitativement tous les éléments responsables des impacts induits par les différents flux de matières et d'énergie estimés à la phase précédente. Il s'agit ici d'effectuer d'abord une classification des impacts environnementaux par catégorie. Ensuite, pour caractériser les catégories, tous les produits d'une même catégorie sont transformés dans une unité commune. Exemple, tous les produits classés dans la catégorie changements climatiques sont transformés en leur valeur équivalente en kilogrammes en CO₂. Grâce à cela, il est possible d'additionner tous les éléments d'une même catégorie pour arriver à une quantité unique par catégorie d'impact. Selon la norme ISO 14042, dix catégories d'impacts sont généralement considérées dans une ACV, à savoir :

Le potentiel de réchauffement climatique (PRC *en anglais global warming potential GWP*), la destruction de l'ozone stratosphérique (*en anglais..... ODP*), la formation d'agent photo-oxydant (smog) (*en anglais.....POCP*), l'acidification (*en anglais.....AP*), l'eutrophisation (*EP*), l'impact éco-toxicologique, l'impact toxicologique chez les humains, l'utilisation des ressources abiotiques, l'utilisation des ressources biotiques, l'utilisation des terres.

L'évaluation de ces impacts permet de déterminer quelles sont les étapes et composantes du cycle de vie d'un produit ou d'un service qui génèrent le plus d'impacts et qui requièrent le plus d'énergie et de ressources. Les résultats de cette analyse sont généralement présentés sous forme graphique, ce qui permet de repérer rapidement les étapes du cycle de vie qui posent un problème et de concentrer les efforts d'amélioration sur ces étapes. Une évaluation par pondération de ces différentes catégories d'impacts est également possible et permet d'en arriver à un indicateur général. Ceci requiert la mise à contribution de méthodes dédiées à cet effet, telles que Eco-indicator 99 ou EDIP 2003.

La quatrième et dernière étape de l'ACV est l'interprétation des données recueillies lors des trois étapes précédentes. En plus d'évaluer la qualité des résultats, cette étape permet l'analyse des possibilités en termes de réduction des impacts environnementaux et d'accroissement du rendement économique d'un produit ou d'un service par une utilisation plus efficace de l'énergie et une réduction ou une substitution de matières premières et secondaires. Ainsi, cette phase permet, entre autres, de répondre aux questions suivantes :

- Est-ce que la quantité de polluants émise dans l'environnement peut être réduite ?
- Est-ce que le produit peut être réutilisé, recyclé ou transformé?
- Est-ce que l'énergie peut être récupérée ?
- Est-ce que le produit peut être fabriqué à partir de matières premières et secondaires moins polluantes?

3. Complexité méthodologique de l'ACV

Le nombre et la diversité des termes et expressions du vocabulaire employé dans les « ACV » provoquent souvent un malentendu entre les utilisateurs du fait que parfois aucune distinction nette n'est faite entre l'inventaire du cycle de vie et l'analyse de cet inventaire (ACV). L'inventaire du cycle de vie peut aussi dénommé « bilan du cycle de vie », si bien qu'il est aisément confondu avec l'analyse du cycle de vie. La complexité de la méthodologie constitue aussi l'une des raisons expliquant la rareté d'ACV complètes publiées. C'est ce qui explique le fait que l'analyse du cycle de vie soit jusqu'aujourd'hui toujours un outil en phase de développement.

En général, l'analyse du cycle de vie doit permettre de faire de manière quantitative et qualitative l'inventaire de tous les enjeux environnementaux significatifs. Cependant, en matière de gestion des déchets ménagers, suite au fait que la plupart des impacts présentent un caractère subjectif ou potentiel, les praticiens de l'ACV ont tendance à ne pas prendre en compte certaines nuisances environnementales difficilement mesurables et à réduire le nombre de paramètres à étudier. Il s'agit de la pollution sonore, la pollution visuelle (l'enlaidissement du paysage), les mauvaises odeurs, l'utilisation des sols ainsi que d'autres risques environnementaux. Autrement dit, il n'y a pas de listes communément acceptées d'impacts environnementaux. En outre les impacts calculés ne sont parfois que des impacts potentiels qui ne représentent pas la réalité locale du moment. Ces impacts sont potentiels pour deux raisons :

- ils sont déduits à partir des émissions du système dont on pense qu'elles ont tels ou tels effets (exemple/l'effet de serre). Tous les effets n'en sont pas connus, ni leurs combinaisons.
- Ils sont calculés sur une des périodes choisies de 100, 500 voire 1000 ans. Qu'en est-il à court terme pour la population locale ou même ou même à plus long terme encore pour la population globale ? C'est pour toutes ces raisons qu'on a vu apparaître à travers le monde plusieurs tentatives de simplification de la méthodologie de l'ACV guidées par les objectifs de l'étude ainsi que la disponibilité des données. En outre, cette analyse de cycle de vie simplifiée tend à présenter ou à fournir les mêmes résultats qu'une ACV complète tout en réduisant le temps nécessaire à cet effet. C'est une pratique souvent utilisée pour les besoins de marketing vert ou de développement d'un nouveau produit.

De l'avis de certains spécialistes de l'ACV, il n'existe actuellement aucune méthodologie qui fasse l'unanimité pour opérer les choix voulus, et cela en raison de deux grands problèmes :

- il y a un manque de connaissances scientifiques dans bien des domaines importants pour l'environnement, et la façon de résoudre certaines questions ne fait pas l'unanimité.
- l'évaluation comparative d'impacts globaux sur l'environnement nécessite l'établissement de priorités et de coefficients de pondération pour définir l'importance relative de différents critères environnementaux. Dans le domaine de l'environnement, l'établissement des priorités ne se fait pas systématiquement car elle repose parfois sur des opinions subjectives, forgées sous l'influence d'intérêts politiques ou nationaux. Ce dernier problème demeure, même lorsqu'on parvient à s'entendre sur des méthodologies. C'est pourquoi il y a de fortes chances pour que des évaluations d'impacts effectuées pour un même groupe de produits, par des organismes différents, et dans des conditions différentes (par exemple, dans différents pays) donnent des résultats différents.

Si l'on ne suit pas toujours des méthodologies approuvées et éprouvées scientifiquement, il y a des grands risques pour qu'une évaluation de l'impact du cycle de vie conduise, dans la pratique, à comparer des facteurs qui ne sont pas comparables, ce qui reviendrait à comparer des pommes avec les oranges. Par exemple si l'on a inscrit la réduction des déchets solides au rang

des priorités, on aura tendance à effectuer un coefficient de pondération le plus élevé au volume plus faible des déchets solides et à la quantité d'emballages usagés qui entre dans le flux de déchets. Cela amènera probablement à prendre des mesures favorisant les emballages réutilisables au détriment des emballages jetables. Il se peut alors que la pression exercée sur l'environnement par les déchets solides se porte d'une part sur l'accroissement de la pollution de l'eau, du fait des équipements de nettoyage et de lavage qu'il faudra installer, et, d'autre part, sur l'augmentation de la pollution de l'air, en raison des opérations de transport supplémentaires qui seront nécessaires. Donc, les différentes formes de l'ACV répondent chacune à un usage précis et certaines formes telles que les ACV simplifiées ne peuvent pas fournir des résultats assez précis pour des usages publics par exemple.

4. Place de l'ACV dans la gestion des déchets ménagers solides

L'ACV appliquée aux déchets est une méthode encore jeune, les exemples d'application sont encore peu nombreux. L'organisation d'une gestion moderne des déchets doit répondre à divers objectifs d'ordre technique, économique, social et environnemental. Il s'agit ici de mettre en place des programmes qui cherchent à développer d'abord la prévention de la production des déchets, puis la valorisation matière ou énergie et enfin l'élimination des déchets non valorisables sans porter atteintes à l'environnement. La nécessité de tenir compte, à la fois, des objectifs définis par des programmes de gestion et des caractéristiques des déchets, conduit à la mise en œuvre de schémas multifilières, combinant différents modes de gestion et de traitement. Dans ce contexte, l'analyse du cycle de vie étant l'une des méthodes d'analyses environnementales existantes susceptibles d'être appliquées au domaine des déchets, peut aider les collectivités des villes africaines en particulier à comparer les différentes possibilités qui s'offrent à elles, et les situer au regard de leurs objectifs prioritaires, dans le cadre de leur situation spécifique. Toutefois, l'analyse du cycle de vie est un outil aujourd'hui qui se situe en dehors de tout cadre réglementaire. C'est plutôt un outil de management environnemental utilisé dans le cadre d'une démarche volontaire, dont l'objectif est de faciliter les décisions en matière de choix d'une filière de traitement des déchets. L'analyse du cycle de vie appliquée à la gestion des déchets ménagers débute au moment où les produits, les marchandises ou les emballages sont jetés à la poubelle par les ménages, et s'achève lorsqu'ils terminent à l'état de matière inerte dans un centre de traitement où il y a aussi des rejets sous forme d'émissions, atmosphériques, aquatiques ou dans le sol; ou lorsqu'ils accèdent à une seconde vie (matières secondaires, compost, énergie, etc.) et ne constituent donc plus des déchets. Donc l'analyse du cycle de vie des déchets ménagers est une étude d'impacts, une analyse globale du cycle de vie de ces déchets.

5. Niveau d'application des idées de l'ACV dans les PED

L'analyse du cycle de vie est un outil de gestion environnementale et de mise en œuvre du développement durable. Malgré son utilisation croissante depuis plusieurs années, les recherches s'effectuent essentiellement aux Etats-Unis, au Canada, en Europe (Pays Nordiques et Europe continentale) et en Asie (Japon notamment). En effet, il n'existe pas de méthode ACV spécifique aux conditions environnementales et économiques africaines en particulier. Dans les pays en développement, la pertinence des idées surtout de cet outil d'analyse environnementale en leur faveur reste encore un sujet de débat, notamment en ce qui concerne sa perception et son potentiel d'adoption par les acteurs locaux (PNUE, 2004). On s'accorde cependant pour dire que la mise en oeuvre d'une approche systémique intégrée, telle que celle de l'analyse environnementale, est indispensable pour créer des conditions de production et de consommation viables dans les pays en développement qui doivent aussi tirer le meilleur parti de ressources naturelles limitées et vulnérables (PNUE, 2004). Plusieurs auteurs ont recommandé que l'ACV, constituant majeur de la gestion du cycle de vie (GCV) des produits et services, soit intégrée aux programmes de développement national des pays en développement et qu'elle soit utilisée pour élaborer les réglementations environnementales de ces pays, même si la GCV et les dispositifs qui s'y rattachent ne sont pas mis en oeuvre dans leur totalité (Kituyi, 2004, PNUE, 2004). Plusieurs initiatives et publications récentes soulignent les besoins et les possibilités d'application des concepts inhérents à l'Analyse du cycle de vie dans le contexte des pays africains, ainsi que les principaux facteurs qui en limitent l'utilisation (exemples : PNUE en 2004, « *The African life Assessment Network (ALCAN)* » ; Kituyi en 2004, « *integrating life cycle approaches to African national development policies : considering the institutional dimension of industrial ecology* »).

Chapitre IV : Fonctions remplies par les principales filières d'élimination des déchets solides dans les PED

1. Aperçu de la situation

Si les centres de stockage modernes sont très respectueux de l'environnement, la situation est nettement plus critique dans les pays en développement. Faute de ressources financières et techniques, de nombreuses métropoles d'Afrique se contentent de déverser leurs déchets dans de gigantesques décharges sauvages. Avec à la clé d'importants problèmes sanitaires et de pollution du sol, de l'eau et de l'air. Ce constat n'est cependant pas une fatalité partout dans tous les pays du sud.

En Egypte, Alexandrie, par exemple, peut être fière de son centre de stockage de Borg El Arab. Aménagé par VEOLIA PROPLETE selon les normes de sécurité européennes, ce centre de stockage des déchets accueille environ un million de tonnes de déchets par an et remplace une décharge sauvage établie au bord de la lagune. Avec le même souci de l'environnement au Burkina Faso, aidée et conseillée par la communauté urbaine de Lyon, Ouagadougou est en train d'aménager l'un des premiers véritables centres de stockage des déchets de l'Afrique de l'Ouest. Chaque tonne de déchets ménagers stockée produit environ 200 m³ de « biogaz » valorisable comme énergie. Cette production peut durer plusieurs décennies. A côté de la décharge, le traitement par compostage des déchets ménagers semble être la filière la plus exploitée en raison de leur grande teneur en matières organiques et du grand besoin des sols de ces pays en fertilisants et en matière organique pour les cultures. Cependant, le compostage reste une technique surtout pratiquée dans la campagne et basée sur la production du compost maison c'est-à-dire le compost que chacun réalise lui-même dans son jardin.

La technique de biométhanisation est jusqu'aujourd'hui perçue comme une solution aux problèmes d'assainissement des eaux usées pour les collectivités à grande concentration humaine tels que les établissements scolaires, les camps militaires, les hôpitaux, les prisons, etc.... Pourtant, c'est une technique qui permet par fermentation anaérobie des déchets organiques, en plus de l'assainissement des milieux, d'obtenir d'une part un effluent épuré qui peut servir de fertilisants pour les cultures et d'autre part un gaz riche en méthane, le « biogaz ». Cette résistance de ces pays à la valorisation et à l'utilisation de ces produits issus de la biométhanisation est expliquée par leur image extrêmement mauvaise que les cultures des populations africaines associent aux matières de fosse d'aisance. Il s'agit d'un comportement culturel des ménages africains associé à une mauvaise appréhension psychosociologique. Or, le maintien d'un mode de vie et d'une culture psychosociologique est toujours fonction de la disponibilité des ressources naturelles. En effet, les populations surtout africaines des villes font face aujourd'hui à un manque criant d'espace pour creuser les latrines traditionnelles

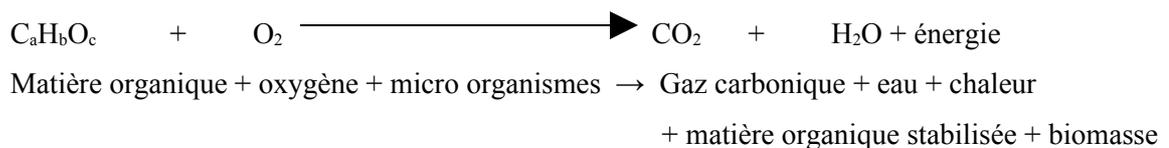
individuelles suite à leur forte concentration démographique. C'est la raison pour laquelle il vaut mieux rompre avec certaines pratiques psycho-socioculturelle qu'exposer sa vie à des risques sanitaires liés au manque d'hygiène. Par ailleurs, la biométhanisation reste la seule filière techniquement et économiquement accessible pour ces populations qui ont aussi un sérieux problème d'énergie. Enfin les autres filières de traitement des déchets mais toujours faiblement exploitées dans les pays en développement sont le recyclage et l'enfouissement technique.

2. Le compostage

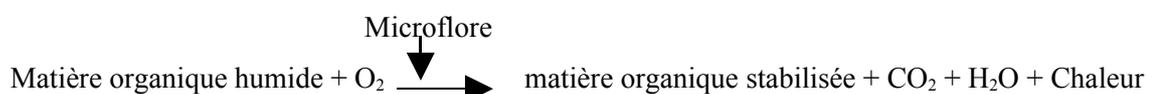
Cette filière de traitement, très développée dans les années 80 en France, permet de désengorger les décharges et de limiter la propagation des dépôts sauvages, tout en produisant un amendement organique indispensable pour les sols agricoles des pays en développement, souvent pauvres en matière organique.

2.1. Objectifs et principes de fonctionnement

Le mot compost est un dérivé du mot latin « compositus » qui signifie composé. Cependant, bien que le compostage soit une pratique ancestrale, il est difficile d'arriver à donner sa définition rapide et précise car selon le point de vue utilisé, les objectifs et les caractéristiques qui lui sont attribués varient. D'après le dictionnaire, le compostage a pour fonction de faire fermenter en présence de l'air, les déchets organiques caractérisés par la présence d'atomes de carbone issus d'organismes vivants, végétaux ou animaux. Il s'agit donc de ce point de vue d'une réaction chimique complexe qui peut se schématiser de la manière suivante :



Pour certains spécialistes comme R.HAUG (1980), le phénomène prend une dimension complexe : il s'agit alors d'une fonction de « décomposition biologique et de stabilisation des substrats organiques dans des conditions qui permettent le développement de températures thermophiles, résultant d'une production calorifique d'origine biologique avec obtention d'un produit final suffisamment stable pour le stockage et l'utilisation sur les sols sans impacts négatifs sur l'environnement ». Donc, selon cette seconde conception, la fonction du compostage est avant tout une technique de stabilisation et de traitement des déchets organiques :

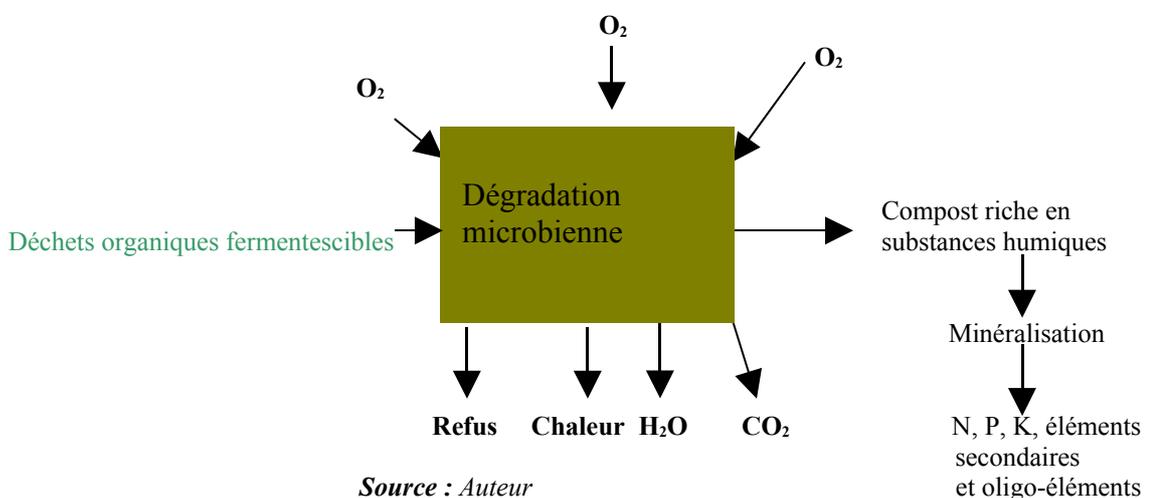


Pour d'autres encore, c'est une fonction de recyclage de la matière organique au moyen de la fermentation aérobie et permet ainsi le bouclage des cycles naturels qui avaient été interrompus par l'abandon des pratiques appropriées.

En analysant ces différents points de vue, on se rend compte que le compostage n'a pas une seule fonction mais plusieurs fonctions. Cependant, en se rapprochant de ces théories, la fonction principale du compostage peut être définie d'une manière générale comme étant un processus biologique contrôlé qui permet aux micro-organismes de transformer les déchets organiques en un produit sec, désodorisé, hygiénisé (c'est à dire destruction des micro-organismes pathogènes), stable et riche en composés humiques (N, K, P, Mg, Ca,...), par la fermentation aérobie : le compost. En d'autres termes, il s'agit scientifiquement d'un processus de décomposition et de synthèse au cours duquel les matières organiques subissent le phénomène de bio-oxydation en présence des micro-organismes indigènes et dans des conditions contrôlées. En effet, dès que les conditions physico-chimiques (aération, humidité, température) le permettent, les micro-organismes constituent une flore complexe (bactéries, levures, champignons, etc.), qui se met en activité rapidement. Cette activité se traduit par une dégradation microbienne aérobie de la matière organique solide générant une chaleur intense responsable de la phase thermophile (élévation de la température des déchets à 70°C en moyenne) (Mustin, 1987 ; ENSP, 2002). La montée de la température et la compétition microbienne permettent une hygiénisation du produit composté par une destruction des micro-organismes pathogènes et exercent une sélection sur la diversité microbiologique du compostage (De Bertoldi et al, 1983 ; Mustin, 1987).

Ainsi, cette fonction principale de bio-oxydation de la matière organique par fermentation aérobie s'accompagne aussi d'autres sous fonctions liées à la production des refus, des vapeurs d'eau, de dioxyde de carbone, et de la chaleur comme l'indique la figure ci-dessous :

Figure 2 : Schéma simplifié du processus de compostage



Dans le domaine de gestion des déchets ménagers, le compostage doit répondre à deux types d'objectifs :

- Traitement par dégradation des matières organiques permettant de stabiliser les déchets, conduisant à une réduction des quantités (pertes de matières sèche de l'ordre de 40% d'après Mustin, 1987) et s'accompagnant d'une maîtrise des odeurs des nuisances
- Production d'un amendement organique ou d'un support de culture de qualité répondant aux besoins des utilisateurs.

Remarque: Tous les déchets organiques ne peuvent pas être traités par le compostage. Les seuls déchets compostables sont les déchets organiques fermentescibles et non pollués, constitués uniquement par des substances organiques proches des composés naturels biodégradables. Les matières organiques d'origine chimique comme les matières plastiques ou d'autres ne se compostent pas.

2.2. Les phases du compostage

Le processus de compostage tel qu'il est largement décrit par certains auteurs (Mustin, 1987 ; Chevalier, 1990 et Leclerc, 2001), est décomposé schématiquement en trois phases :

- la phase initiale pendant laquelle les composés simples (sucres, protéines, hémicellulose) sont dégradés en gaz et en produits minéraux (CO_2 , H_2O , NO_3). Un amendement frais est alors obtenu. La température s'élève progressivement à cause de l'activité et de la croissance des micro-organismes mésophiles aérobies.
- la phase thermophile qui peut durer plusieurs mois, voit le compost atteindre de hautes températures, 70-80°C. La fraction organique cellulaire est dégradée en substances humiques ou pré-humiques plus stables.
- la phase de stabilisation pendant laquelle le taux de décomposition décroît, la température chute. On obtient alors un amendement constitué de matière organique stabilisée et de substances minérales.

2.3. Paramètres d'optimisation du compostage

La principale difficulté pour viabiliser le procédé de compostage dans les pays du sud est la mise en œuvre de la collecte sélective de déchets organiques qui est indispensable pour obtenir un compost de bonne qualité et un plus grand revenu. Afin d'optimiser le compostage, il faut que ces micro-organismes reçoivent un approvisionnement continu en aliments (c'est-à-dire les déchets organiques), en eau et en oxygène. Il faut en outre contrôler la température de la matière à composter. La température est un facteur important du compostage car c'est un paramètre de suivi facile à mesurer qui permet d'évaluer l'équilibre biochimique dans la matière au

compostage. En effet, la température est une mesure indirecte de l'activité microbienne. Elle reflète le régime des échanges thermiques de la masse en compostage (Belguith *et al*, 2004). La croissance de la température est due à la chaleur dégagée par l'activité microbienne et au stockage d'une partie de cette chaleur, grâce aux propriétés isolantes des déchets organiques, dans la masse solide, l'eau et dans les gaz des espaces lacunaires (Barrington *et al*, 2003).

Théoriquement, l'évolution de la température peut être présentée par les trois phases suivantes, qui se succèdent dans le temps (Mustin, 1987):

- la phase mésophile où des colonies microbiennes aérobies se développent et dégradent par voie enzymatique les polysaccharides. Les réactions de dégradation étant exothermiques, elles provoquent une montée en température de la matière en compostage. L'énergie présente dans les combinaisons organiques est en effet transformée en chaleur. Au cours de cette phase, la production de chaleur est active et elle est supérieure aux pertes causées par le transfert de chaleur avec l'extérieur (Barrington *et al*, 2003).

- la phase thermophile démarre avec l'apparition des souches microbiennes thermotolérantes, actives jusqu'à 60°C. La température continue d'augmenter jusqu'à atteindre des maximums avoisinant les 70, 80°C, ce qui provoque alors une autostérilisation de la matière avec la neutralisation des germes pathogènes et des graines adventices.

- la phase de refroidissement, où la température diminue progressivement jusqu'à la température ambiante. Les champignons et actinomycètes peuvent alors recoloniser la matière. Le compost entre alors en maturation.

La plupart des déchets organiques renferment tous les éléments nutritifs nécessaires à la croissance des micro-organismes, mais ces derniers se développent mieux avec certains niveaux d'azote et de carbone. Comme les plantes, les micro-organismes dans le compost ont besoin d'éléments nutritifs (azote, phosphore, potassium et oligo-éléments), mais avec une grande différence due au fait que ces micro-organismes exigent du carbone organique comme source d'énergie au lieu du gaz carbonique et la lumière pour les plantes (Larsen and Mc Cartney, 2000).

En effet, le rapport C/N qui exprime la proportion des quantités respectivement biodisponibles en carbone et en azote, constitue un facteur important de la décomposition aérobie des produits organiques. La valeur optimale qui peut garantir un bon démarrage et un bon déroulement du compostage des déchets ménagers se situe selon les auteurs (Gootas, 1959 ; Mustin, 1987 ; Villebonnet, 1988) entre 25 et 30. S'il est trop élevé, le temps requis pour la dégradation devient plus long et s'il est faible, l'azote est, en grande partie, perdu sous forme d'ammoniac par voie de volatilisation (Souidi, 2001). Si c'est nécessaire, les déchets peuvent être mélangés pour atteindre un rapport C/N voulu. Pour des déchets ménagers avec un rapport C/N faible, on peut ajouter des matières riches en carbone comme des copeaux ou de la sciure de bois, de la paille, du papier ou toute matière cellulosique ou ligneuse. Ces additifs peuvent aussi jouer le rôle

d'agents structuraux. Dans le cas contraire, avec un rapport C/N fort, on peut ajouter des matières riches en azote comme les algues marines, les tontes de gazon et certaines boues résiduaires. Les micro-organismes consomment 15 à 30 fois plus de carbone que d'azote (Biocycle, 1989). Le tableau 1 donne des ordres de grandeur de rapports C/N de quelques matières organiques :

Tableau 4 : Rapport C/N de quelques matières organiques compostables

Matières	Rapport de C/N
Ordures ménagères brutes	15 à 25
Boues activées	6
Gazon	10 à 20
Feuilles mortes	20 à 50
Fanes de pomme de terre	26
Sciures de bois	150 à 511
Algues marines	17
Papiers cartons	120 à 170
Déchets de légumes	11 à 12
Tailles d'arbustes	50 à 100
Pailles des céréales	90 à 120

Source : Gootas, 1959 ; Mustin, 1987 ; Villebonnet, 1988 ; Leclerc, 2001 ; Sadak and El Taweel, 2003

Le compostage conduit alors à la production de gaz carbonique, de chaleur et d'un résidu solide riche en composés humiques : le compost. Mais l'objectif premier de ce type traitement consiste en la production d'un compost valorisable en agriculture. Le tableau suivant donne les teneurs et les limites normatives en métaux lourds de différents PED :

Tableau 5 : Teneurs et limites normatives en métaux lourds de différents PED

Métaux	Bénin	Guinée	Mali	Egypte	Valeur recommandée pour les PED
As	-	-	-	3,5	10
Cd	6,3	1,5	-	0,3	3
Cr	12,4	140	-	19,3	50
Cu	5,4	75	10	17	80
Hg	-	-	0,026	0,15	1
Ni	-	-	6,5	7,3	50
Pb	107	140	3,4	15,4	150
Zn	11	-	110	67,2	300

Source : Informations tirées de la thèse d'Aloueimine, 2006

Ce tableau permet de comparer la qualité des composts produits dans les PED par rapport aux normes fixées par la Banque mondiale.

2.4. Bénéfices du compostage

En plus de ses impacts positifs sur l'environnement, le compostage offre des bénéfices agronomiques, économiques et sociaux. En effet, au point de vue environnemental et agronomique, le compostage des déchets fermentescibles, qu'il soit réalisé dans des usines ou individuellement dans des cours et jardins, est un procédé avec plusieurs avantages, qui, au-delà de l'obtention du compost, se traduisent par :

- la réduction de la quantité de déchets destinés à d'autres types de traitement plus chers et potentiellement plus nocifs pour l'environnement ;
- la contribution à l'augmentation de l'efficacité du procédé d'incinération pour les pays qui en disposent déjà avec récupération de l'énergie, dû à l'augmentation relative du pouvoir calorifique des déchets ménagers, en conséquence de la diminution de la teneur d'humidité ;
- la diminution des impacts des sites d'enfouissement principalement par l'augmentation de leur durée de vie utile et la limitation de leur expansion ;
- la réduction de l'exposition des nappes phréatiques aux lixiviats, réduction des émissions de gaz à effets de serre (méthane) dans les sites d'enfouissement technique ;
- la contribution à la conservation des ressources et la biodiversité et à l'augmentation de la qualité et l'intérêt de certains espaces par l'utilisation du compost en horticulture
- la réduction des distances de transport des lieux de valorisation par rapport aux lieux d'enfouissement car ces derniers sont en général très éloignés des lieux de production (villes ou habitations) ;
- la diminution des besoins en produits phytosanitaires et en engrais chimiques ainsi les impacts négatifs liés à leur utilisation (Florence CHARNAY, 2005) ;
- la promotion des pratiques de développement durable en agriculture par l'utilisation du compost qui permet d'éviter de recourir à la matière vierge nécessaire à la fabrication des engrais chimiques. Celle-ci s'inscrit dans une nouvelle approche de conservation des ressources. Le tableau suivant donne la composition des différents composts produits dans différents PED

Tableau6 : Teneurs (en%) en fertilisants et en métaux lourds des composts de quelques PED

paramètres	Bénin	Guinée	Mali
K ₂ O	0,62	1,09	1,06
CaO	5,46	5,75	9
MgO	0,36	0,75	0,46
P ₂ O ₅	4,58	1,05	0,092
Cd	63.10 ⁻⁵	15.10 ⁻⁵	-
Cr	124.10 ⁻⁵	14.10 ⁻³	-
Cu	54.10 ⁻⁵	75.10 ⁻⁴	103
Pb	107.10 ⁻⁴	14.10 ⁻³	34.10 ⁻⁵
Zn	11.10 ⁻⁴	-	11.10 ⁻³
Hg	-	-	26.10 ⁻⁷
Ni	-	-	65.10 ⁻⁵
As	-	-	-

Source : Matejka et al, 2001; Charnay, 2005

Quant aux avantages économiques et sociaux, on peut citer entre autres :

- la soustraction des coûts de la collecte, du transport et de l'élimination des matières putrescibles à ceux de la gestion des matières résiduelles mais les emplois des chiffonniers peuvent être indirectement menacés;
- la réduction du coût d'achat des engrais: le compost pouvant servir d'amendement de sols en remplacement des engrais chimiques et par conséquent la balance commerciale des pays en développement devient de plus en plus positive car les importations des engrais chimiques vont diminuer ;
- la création d'emplois et contribution au développement économique dans le secteur du compostage et des activités reliées de près ou de loin à la fabrication et à l'utilisation du compost dans les PED. Par contre, il y aura moins d'emplois dans le secteur de production d'engrais chimiques dans les pays développés ;
- la sensibilisation de la population aux manières concrètes de récupérer, recycler et valoriser les matières résiduelles ;

Cependant, si le procédé de compostage se fait avec des déchets indifférenciés, il y a un risque d'obtenir un revenu très bas et le compost n'est pas de meilleure qualité à cause des fragments de verre et d'autres déchets par exemple qui ne sont pas fermentescibles. La teneur en métaux lourds peut aussi être élevée.

3. La décharge

3.1. Rôles et principes de fonctionnement

L'une des méthodes largement utilisées pour gérer les déchets dans les PED est la mise en décharge. Toutefois, si cette solution est la plus facile à mettre en œuvre, il n'en reste pas moins qu'elle doit, pour atteindre son but, respecter certaines règles, ce qui est très rarement le cas. Nous savons en effet que jeter ses ordures dans le premier terrain vague peut être dommageable

pour l'environnement et pour les populations. Le terme « décharge » a longtemps désigné les anciens centres d'enfouissement non contrôlés du fait de l'absence d'un contrôle rigoureux de la nature des déchets stockés et l'absence d'infrastructures géotechniques garantissant la maîtrise des émissions liquides (lixiviats) et gazeuses (biogaz).

Les centres d'enfouissement technique ont pour fonction principale de stocker et de stabiliser la matière constitutive des déchets. Cependant, les centres d'enfouissement technique n'ont pas seulement la fonction relative à la stabilisation et au stockage des déchets dans la mesure où ils s'accompagnent d'autres fonctions liées la production des lixiviats, du biogaz, etc. Ils sont complètement assimilables à une unité de traitement des déchets au sein de laquelle les matières premières et d'énergie sont consommées et des rejets dans l'environnement peuvent être émis. Le principe de fonctionnement d'une décharge peut être assimilé à un réacteur bio physico-chimique où se produisent des réactions aboutissant à la transformation chimique, physique et biologique des déchets. Du fait de la nature des déchets stockés, du mode de gestion de l'exploitation, des conditions géologiques et hydrologiques du site, chaque centre de stockage est un cas unique ; il n'est donc pas envisageable de déterminer avec précision un mode d'évolution qui serait applicable à tous les centres de stockage. Ainsi, certains phénomènes sont communs à la majorité des sites et peuvent être quantifiés, permettant ainsi de caractériser l'évolution générale d'une installation de stockage, en particulier en ce qui concerne les aspects biologiques, physico-chimiques, hydrauliques :

- les matières biodégradables mises en décharge font l'objet d'une évolution biologique sous l'action des bactéries aérobies puis des bactéries anaérobies ;
- les eaux qui percolent à travers la masse des déchets favorisent la biodégradation des matières organiques fermentescibles et produisent des *lixiviats* en se chargeant de substances chimiques organiques ou minérales provenant des déchets ou des produits de dégradation des déchets ;
- des réactions physiques ou chimiques conduisent à la destruction partielle de la matière et à la solubilisation de certaines espèces ou à leur transformation en *biogaz*.

La dégradation des déchets dans un centre de stockage est un phénomène très complexe qui s'effectue en plusieurs étapes dont deux d'entre elles peuvent être considérées comme principales :

- une première étape se déroulant en présence d'oxygène et qui est relativement courte ;
« *c'est la dégradation aérobie (fermentation)* »
- une seconde étape en l'absence d'oxygène et beaucoup plus longue ; « *c'est la dégradation anaérobie* ».

Cependant, la grande fraction des déchets solides ménagers est constituée de substances putrescibles, dont l'enfouissement ne permettra pas la dégradation naturelle aérobie. La plupart des décharges non contrôlées finissent par produire des infiltrations d'eau de pluie et des

liquides issus de déchets en décomposition anaérobie, ou *lixiviats*, vers des eaux souterraines. Ces effluents contiennent souvent des composés chimiques organiques et inorganiques solubles, de micro-organismes et des particules solides (Tchobanogoulos et al, 1993). Ces composés sont généralement constitués de produits azotés, métaux lourds, solvants, alcools, pesticides, hydroxy-aromatiques organiques, acides aliphatiques, phénols, bactéries, etc.... (Clément, 1995). Ce qui implique des effets à long terme sur l'eau des nappes phréatiques et de surface.

La composition chimique des lixiviats provenant des enfouissements dépend du type de déchets déposés (résidentiels, industriels, agraires) mais aussi de leur état de décomposition, du mode d'opération, des conditions climatiques et géologiques, ainsi que de l'âge de l'enfouissement (Hjlemslev et al.. 1995). À l'intérieur des jeunes sites, les bactéries acidifiantes sont généralement prépondérantes dans la microflore et 80-90% du contenu organique des lixiviats consistent en des produits relativement facilement biodégradables sous forme d'acides gras volatils (AGV) qui sont convertis en biogaz par les micro-organismes méthanogènes (Welanders et al. 1997). De plus, les lixiviats dans la phase méthanogène contiennent souvent des concentrations élevées en ammonium, ce qui constitue un problème environnemental à cause des effets toxiques de cet ion sur l'environnement (Forgie, 1988). Les déchets organiques provoquent aussi au fur des années l'émanation de gaz méthane, gaz à effet de serre qui est, au demeurant, explosif. Ensuite, au-delà de nuisances olfactives s'ajoutent des dégradations du paysage.

3.2. Configuration d'un site de décharge

La stabilisation biologique des déchets comprend une série de réactions chimiques, physiques où les produits d'une étape deviennent les substrats de l'étape suivante, et dans lesquelles différents types de micro-organismes coexistent (Onay et al.. 1998). La concentration en nutriments, la présence d'inhibiteurs favoriseront la croissance d'un type de micro-organisme plutôt qu'un autre. Enfin, on ne sait pas encore bien si la communauté microbienne qui se développe à l'intérieur de l'enfouissement est identique (ou même en équilibre) à celle rencontrée dans les lixiviats (Blakey et al, 1995). Les mécanismes métaboliques rencontrés à l'intérieur d'un site enfouissement technique sont couramment identifiés par cinq phases successives qui se déroulent simultanément dans un massif de déchets (Yann Henry, 1999) :

Phase I : C'est une brève phase aérobie, qui a lieu immédiatement après avoir disposé les déchets. La matière organique facilement biodégradable est décomposée et du CO₂ est généré.

Phase II : Une première phase anaérobie se développe suite à la phase aérobie. L'activité des bactéries fermentaires et acétogènes génère des acides gras volatils (AGV), du CO₂ et de l'H₂.

Le lixiviat acidifié peut alors contenir des fortes concentrations en calcium, fer, métaux lourds et en ammoniac.

Phase III : Une seconde phase anaérobie débute avec une faible croissance des bactéries méthanogènes. La conversion des AGV est causée par une augmentation du pH et de l'alcalinité. Le pH plus basique a tendance à diminuer également la solubilité du calcium, du fer et des métaux lourds. L'ammoniac continue d'être relargué sans toutefois être converti.

Phase IV : Cette phase, qui débute après des mois voire des années, est caractérisée par une forte production de méthane qui maintient des faibles concentrations en AGV et en H₂.

Phase V : Alors qu'il reste uniquement les composés organiques réfractaires, la production de méthane devient si faible que l'oxygène et l'azote gazeux de l'atmosphère diffusent vers les déchets. On considère alors que les déchets sont stabilisés.

3.3. Caractéristiques quantitatives et qualitatives des lixiviats

Les lixiviats ou eau de percolation de la décharge sont chargés bactériologiquement et surtout chimiquement de substances tant minérales qu'organiques. Ils peuvent se mélanger aux eaux de surface comme aux eaux souterraines et donc constituer un élément polluant tant par leur aspect quantitatif que qualitatif (éléments écotoxicologiques). La source principale en eaux d'une décharge vient des précipitations. L'eau traversant la couche de déchets va se charger en substances polluantes telles que la matière organique soluble résultant de l'activité biologique de la décharge, des constituants inorganiques comme les métaux lourds (provenant des piles), et des germes qui peuvent être très dangereux pour la santé et l'environnement. La production de lixiviat est généralement liée aux conditions climatiques (fréquence des précipitations, température et humidité moyennes, direction et forces des vents prédominants, phénomènes d'évapotranspiration), aux caractéristiques planimétriques du site et des aires avoisinantes et à l'infiltration et à l'humidité du sol et des déchets enfouis. Elle dépend également des conditions d'opération de stockage (recirculation du lixiviat sur la masse de déchets solides, niveau de compaction des déchets, Liberti et al, 1997).

La qualité des lixiviats dépend de plusieurs facteurs comme le type de déchet solide, sa compaction, sa composition, sa profondeur, sa densité, sa porosité et son prétraitement. La température et l'âge de l'enfouissement sont également des facteurs à considérer, du fait du changement chimique de l'environnement (potentiel d'oxydoréduction, pH, force ionique, etc, Hjelmar et al, 1995). Enfin, la qualité des lixiviats dépend de leur temps de résidence dans le bassin où ils sont entreposés ultérieurement. De manière générale, il est difficile de prévoir la composition des lixiviats car elle dépend de la nature des déchets, du volume des précipitations, ainsi que du stade de dégradation atteint. Des jeunes lixiviats (encore dans leur phase acidogène) sont caractérisés par des hautes concentrations en substances organiques (DCO, DBO₅, COT et acides gras volatils), des concentrations en azote et en phosphore peu excessives et un pH faiblement basique. La demande chimique en oxygène, DCO, quantifie l'état

d'oxydation des substances présentes dans les lixiviats. Elle est exprimée en mg de O₂ consommé par litre de lixiviats. La demande biologique en oxygène à 5 jours, DBO₅, quantifie la biodégradabilité des lixiviats. Elle est déterminée en fonction de la quantité d'oxygène consommé par les micro-organismes présents dans les lixiviats. Elle est exprimée en mg de O₂ consommé par litre de lixiviats. Le carbone organique total, COT, est la quantité totale de carbone présent dans les lixiviats. Il est mesuré en quantifiant le CO₂ produit par la combustion des lixiviats. Il est exprimé en mg de C par litre de lixiviats. Les matières en suspension représentent la fraction non dissoute des lixiviats. Le rapport DBO₅/DCO représente la biodégradabilité des lixiviats. Plus le rapport est élevé, plus les lixiviats sont biodégradables (<0.1:non biodégradable, >0.8 : totalement biodégradable, Onay et al, 1998). Le rapport DCO/COT représente l'état d'oxydation des lixiviats. L'azote Kjeldahl total représente l'azote organique et l'azote ammoniacal.

Les lixiviats à un stade avancé de dégradation sont particulièrement stables et sont caractérisés par des pH et des niveaux d'alcalinité plus importants (pH compris entre 6,5 et 8,3). Ils sont souvent plus riches en ammoniac du fait de l'hydrolyse des composés azotés et de la fermentation des substrats azotés biodégradables (Onay et al, 1998). La DCO est par contre plus faible de même que la DBO₅ indiquant un niveau de dégradation des substances organiques plus important. Un faible rapport DBO₅/DCO (inférieur à 0,4, Clément, 1995) est caractéristique d'un vieux lixiviat (Welandar et al, 1997).

Tableau 7 : Concentrations du lixiviat avec l'âge de l'enfouissement

Âge de l'enfouissement (ans)	0-5	5- 10	10-20	>20
DBO (mg/l)	10000-25000	1000-4000	50-1000	<50
DCO (mg/l)	15000-40000	10000-20000	1000-5000	<1000
Azote Kadjedahl total (mg/l)	1000-3000	400-600	75-300	<50
Azote ammoniacal (mg/l)	500-1500	300-500	50-200	<30
Alcalinité (mgCaCO ₃ /l)	10000-15000	1000-6000	500-2000	<500
pH	5-6	6-7	7-7,5	7,5

Source : Herny Yann (1999)

3.4. Composition et caractéristiques du biogaz

Le biogaz contient principalement du méthane et du gaz carbonique. La proportion de ces deux gaz dépend de la nature du substrat, et précisément de la proportion Carbone - Hydrogène - Oxygène - Azote (CHON). Un substrat riche en C et H produit une forte proportion de méthane, jusqu'à 90 % (ADSE, 2005). Un substrat moyennement riche, comme la cellulose, produit un biogaz contenant typiquement 65 % de méthane et 45 % de gaz carbonique. En général, on se préoccupe naturellement de ces deux constituants majoritaires (méthane, gaz carbonique..) pour oublier le reste.

La production de biogaz est donnée à partir de l'équation classique de BUSWELL :



Ainsi, pour les glucides (formule générique CH₂O), l'équation donne :



En revanche, pour un corps gras : $2 C_9H_{20}O_2 + 6 H_2O \longrightarrow 13 CH_4 + 5 CO_2$ (65 % de méthane). Le biogaz contient aussi d'autres produits générés par la dégradation de la matière organique :

- composés soufrés (H₂S, mercaptans)
- composés azotés (ammoniaque)
- hydrogène et produits intermédiaires de fermentation : alcools, acides, esters...

Le biogaz peut contenir également à l'état de trace, des composés xénobiotiques présents dans le substrat d'origine. C'est le cas notamment du gaz de décharge, qui contient de faibles quantités de molécules provenant des fréons, solvants, peintures, aérosols etc. Le tableau suivant donne la composition moyenne du biogaz produit dans les CET.

Tableau 8 : Composition moyenne du biogaz issus des CET

Composés	Part
CH ₄	45-65%
CO ₂	25-45%
N ₂	4-8%
O ₂	1%
H ₂ S	0,4 g/m ³
H ₂ O	11,7 g/m ³
Halogènes (Cl, F)	1,4 g/m ³
COV	0,1-5 mg/m ³
Métaux lourds volatils	état de traces
Dioxines	présence accidentelle

Source: ADSE (2005)

Le gaz de décharge est un mélange en proportion variable de biogaz et d'air. L'air est introduit dans le gaz par les défauts d'étanchéité du système de captage du gaz, ou des parois (couverture, parois latérales). Cette proportion varie en fonction du régime d'aspiration et des conditions météorologiques. Cependant, le rapport CH₄/CO₂, indicateur du déroulement de la fermentation, est généralement très stable dès lors que la fermentation est bien établie. Il est de 1,3 à 1,4, caractéristique de déchets composés principalement de cellulose (ADSE, 2005).

3.5. Avantages de la mise en place d'un centre de stockage

1° L'ultime maillon indispensable à toute filière de traitement

Quel que soit le procédé de traitement de déchets adopté, la création d'un centre de stockage reste inévitable car il existe toujours des déchets ultimes qui n'ont pas d'autre destination finale possible. Même en tenant compte du traitement des déchets ménagers à travers le procédé d'incinération qui réduit substantiellement le volume des déchets traités, un centre de stockage est toujours nécessaire pour les déchets qui ne peuvent pas être incinérés, les déchets dangereux, les cendres et les rebuts de l'incinération. Donc, les centres de stockage occupent une place de choix et jouent un rôle indispensable car toutes les filières de traitement des déchets ménagers que ce soit l'incinération, le recyclage des métaux et des plastiques ou la filière de valorisation de la matière organique, ont toujours besoin en complément des centres d'enfouissement pour le stockage des résidus qu'elles produisent. De ce fait, les centres de stockage des déchets représentent donc l'ultime maillon indispensable à toute filière de traitement des déchets. Un centre de stockage constitue aussi un réservoir d'énergie (biogaz) utilisable et valorisable à l'extérieur du site à condition que certains problèmes liés au drainage, à la récupération et à valorisation énergétique aient pu être réglés.

2° L'effet « puits de carbone » d'une décharge

La problématique relative à l'augmentation de « l'effet de serre » suite à production du biogaz dans une décharge doit aussi prendre en compte l'effet « puits de carbone » que représente cette dernière. En effet, tout le carbone n'est pas transformé en biogaz : une petite partie se retrouve dans les lixiviats, la quasi totalité des matières de synthèse (plastiques) n'est pas dégradée, et une partie significative du carbone d'origine biologique (la part réfractaire à la digestion, comme la lignine) ne sera pas non plus transformée. Dans le cas d'une décharge, on remarque donc que tout le carbone (que ce soit sous forme de biogaz ou sous forme des lixiviats) n'est pas directement émis. Il met un certain temps pour être émis dans l'atmosphère ou être décomposé. On voit ainsi que les décharges forment en quelque sorte des puits de carbone en stockant du carbone non émis dans l'atmosphère.

Chapitre V. Etude des fonctions du compostage et de l'enfouissement au moyen de l'ACV

1. Analyse du cycle de vie co-fonctionnelle

Comme on l'a signalé au chapitre précédent, il existe au sein de la fonction principale relative au traitement des déchets ménagers, d'autres fonctions qui sont à l'origine des impacts environnementaux au cours des différentes étapes des systèmes de compostage et de décharge. L'analyse de ces fonctions secondaires et des impacts environnementaux associés à l'aide de l'ACV constitue ce qui peut être appelé « *analyse du cycle vie co-fonctionnelle* ». La notion de fonction est très générale. En effet, elle peut correspondre à la fonction au sein d'un système (la sous-fonction) ou bien encore à la fonction du système entier. Par exemple, chaque partie d'un vélo a sa fonction : le guidon sert à diriger l'engin tandis que la chaîne sert à transmettre l'énergie musculaire à la roue; mais le vélo lui-même a la fonction de transporter quelqu'un d'un point à un autre. Dans le cadre de ce travail, la fonction principale que doivent remplir le compostage et la décharge est la transformation des déchets ménagers de leur état nuisible pour l'environnement en état bénigne (passage de l'état nuisible à l'état bénin). Cependant, ces filières sont composées de processus conçus ou contrôlés par l'homme pour remplir non une seule fonction mais diverses fonctions. Toutefois, le fait qu'un processus soit contrôlé ne signifie pas que les fonctions liées aux interactions avec d'autres processus ou l'environnement soient contrôlées. C'est pourquoi, il est toujours important de prendre en compte les multiples devenir des déchets plutôt qu'une chaîne linéaire en vue de prendre en compte les devenir non prévus. Au cours de la transformation chimique des déchets ménagers dans les centres de compostage et de décharge par exemple, les molécules carbonées ou azotées contenues dans ces déchets vont conduire à des émissions de CO₂ et de NO_x ainsi que de multiples autres composés carbonés ou azotés tout au long du cycle de vie associé au service de traitement de ces déchets. Dans une Analyses de Cycle de Vie du service de traitement des déchets ménagers", on analyse tout le cycle de vie de ce service, ce qui correspond à l'analyse des processus liés à cette fonction de traitement.

2. Résolution du problème de l'ACV co-fonctionnelle

Une bonne résolution du problème de l'ACV co-fonctionnelle serait de déterminer le système qui apporte le maximum de sous-fonctions utiles en posant le minimum de problèmes environnementaux. L'évaluation des « *sous-fonctions* » consiste à inventorier par exemple dans le cas d'une décharge, les émissions de CO₂, NO_x, H₂S, CH₄, lixiviats et leur teneur en

composés azotés, qui sont produits et effectivement rejetés dans l'environnement. Il est vrai que la fonction principale d'une décharge n'est pas de produire l'une ou l'autre substance mais comme la production de ces différents polluants est inévitable, on peut considérer ces émissions comme étant le fruit des « *fonctions non voulues ou inutiles* ». Cette description doit être faite en tenant compte de toutes les ramifications possibles du système à tous les niveaux du système. Dans ce cas, on affecte les impacts du système aux différentes fonctions en tenant compte des implications au niveau des autres systèmes. Il s'agit ici de prendre en compte les différentes « *co-fonctions simultanées* » où plusieurs fonctions sont remplies par un même processus. En effet, le système de compostage-stockage des déchets ménagers s'accompagne de la production du compost, biogaz ainsi que l'émission de plusieurs substances polluantes dans l'environnement. Ainsi, on peut s'imaginer qu'à l'intérieur du processus ou de la fonction de « traitement des déchets » dont l'objectif principal est de rendre service d'élimination ou de traitement des déchets, il existe d'autres fonctions qui sont responsables de la génération des ces différents flux. C'est ce qu'on appelle « *co-fonctions simultanées* ».

Les co-fonctions simultanées sont remplies par un même processus. Dans les ACV, on est censé analyser un système (le cycle de vie) lié à l'unité fonctionnelle. Pourtant au cours du cycle de vie, certains processus pris en compte remplissent des fonctions qui ne servent pas à l'unité fonctionnelle considérée. Pour affecter les flux environnementaux uniquement à l'unité fonctionnelle, on doit résoudre les problèmes d'affectation à tous les niveaux du cycle de vie. Considérons le cas de deux systèmes 1 et 2 : le système 1 remplit la fonction A et la fonction B tandis que le second système ne remplit que la fonction A. L'existence de la fonction B empêche de comparer de façon simple ces systèmes à partir de leur impact environnemental respectif. Les fonctions peuvent être des fonctions physiques relatives au traitement de déchets ou à la production de produits. Elles peuvent aussi être des fonctions non physiques (générant des services). On parle dans le premier cas de *co-traitement*, dans le deuxième cas de *co-production* et dans le troisième cas de *co-service*. Le co-traitement concerne par exemple une décharge qui traite simultanément plusieurs déchets. La co-production concerne par exemple un centre compostage qui produirait du compost et du biogaz. Le co-service concerne par exemple un trajet en camion qui sert à transporter des personnes et des biens simultanément.

2.1. Prise en compte des co-fonctions simultanées sans élargir le système

Pour résoudre le problème de co-fonctions dans le cas décrit précédemment, on considère un nouveau système (système 3) qui remplit uniquement la co-fonction posant problème. Deux possibilités existent alors : soit les impacts environnementaux du système 3 sont soustraits du système 1, soit ceux-ci sont additionnés à ceux du système 2. Dans le cas de la soustraction, on est alors ramené à une comparaison sur la base de la fonction A. Pour ce qui est de la résolution

par addition, on compare alors sur la base de la somme des fonctions A et B. La procédure par addition a l'avantage d'éviter l'apparition de flux environnementaux négatifs, mais l'unité fonctionnelle est modifiée. La démarche par élargissement n'est pas exempte de critiques. Il y a souvent de nombreuses manières de définir le système alternatif (système 3). De plus ce système alternatif peut lui-même remplir de nouvelles co-fonctions, ce qui peut amener la prise en compte d'un système de plus en plus large.

2.2. Résolution par décomposition du système

On décompose le système en sous-système correspondant à chacune des fonctions. En reprenant le cas théorique précédent, cela permet d'affecter certains flux environnementaux du système 1 à la fonction A et d'autres à la fonction B. Considérons, par exemple, une décharge d'ordures ménagères produisant simultanément des lixiviats et du biogaz. Un problème de co-fonction se pose si l'on veut obtenir les flux environnementaux correspondant aux lixiviats ou au biogaz pris isolément. En étudiant la décharge de façon approfondie, il est possible d'associer certaines parties de la décharge à la production des lixiviats et d'autres à la production du biogaz. Dans ce cas l'allocation s'effectue sur une base physique. De façon plus théorique, définissons F_i (avec $i = 1$ à n) pour les différentes fonctions remplies par un système. Définissons FE_j (avec $j = 1$ à m) pour les différents flux environnementaux de ce même système. Les différents FE_j ne sont pas forcément de nature différente. Si le nombre de fonctions est impair c'est à dire $i = 1$ à 5 et associant un nombre pair de flux environnementaux c'est à dire $j = 1$ à 6 , ce système pose des problèmes d'affectation des flux environnementaux à chacune des fonctions. Donc, en décomposant le système en différents sous-systèmes (remplissant chacun une des co-fonctions), chaque flux environnemental FE_j doit en principe être associé à une fonction F_i donnée.

2.3. Résolution sans décomposition du système

Il n'est pas toujours possible de décomposer un système, soit à cause de l'absence de données précises comme c'est le cas de notre travail, soit parce que certains flux environnementaux sont liés à plusieurs fonctions se réalisant simultanément. Nous devons alors considérer le système avec ses fonctions multiples. Une fraction des flux environnementaux est alors affectée à chacune des fonctions. Pour le cas théorique précédent, une partie de chaque flux environnemental du système 1 est alors affectée aux fonctions A et B. Dans le cas général, chaque flux environnemental FE_j est alors réparti entre chaque fonction F_i . Cela revient à déterminer la quantité X_i tel que le flux environnemental associé à chaque fonction F_i soit égal à $X_i FE_j$. X_i représente en quelque sorte la part de responsabilité de la fonction F_i pour le flux environnemental FE_j . La somme des flux environnementaux affectés à chaque fonction doit être égale aux flux environnementaux du système. $\sum X_i FE_j = \sum FE_j$ ce qui revient à poser que $\sum X_i$

= 1. C'est ce qu'on appelle l'*additivité*. L'affectation d'une part des flux environnementaux (qui revient à déterminer X_i) a donné lieu au développement de différentes méthodes.

2.4. Résolution basée sur l'étude des causalités

La *causalité* est ce qui relie la cause à l'effet. Dans ce cas, il faut analyser dans quelle mesure chaque fonction au sein d'un système est la cause des flux environnementaux. Autrement dit il s'agit d'affecter les flux environnementaux du système à chacune de ses fonctions en relation avec leur responsabilité respective. On distinguera les « *causalités physiques* » des « *causalités sociales* ». Dans les causalités physiques, on quantifie les flux environnementaux sur base de notions comme la masse, le volume relevant des sciences de la chimie, la physique et la technologie. C'est le cas où la quantification est la plus aisée. Les causalités sociales s'appuient quant à elles sur les raisons d'existence des processus. Les raisons d'existence des processus sont par définition sociales. En effet les processus anthropiques sont, en principe, aux services des êtres humains. La détermination des causalités sociales est basée sur les notions qui relèvent des sciences sociales comme la sociologie, la psychologie, l'économie, l'histoire ou la géographie etc. Et dans ce cas, la quantification la plus aisée des flux environnementaux utilise les données des *valeurs économiques* (Huppes, 1994).

Cependant, un certain nombre d'approches a été développé à partir des choix de causalités (physique ou sociale) qu'elles favorisent. Un premier type d'approche consiste à ne considérer que les causalités physiques. Cette vision est développée par Boustead (1992) et est reprise par le « code of practice » (Consoli et al, 1993). Boustead refuse ainsi de prendre en compte les données socio-économiques qui ne sont pas jugées suffisamment objectives. La norme AFNOR (1996) établit que les données physiques doivent être utilisées en priorité. Il existe toutefois des cas évidents où les données physiques ne représentent pas la réalité causale de façon adéquate. Un exemple classique est celui de la production de diamants lorsque des co-produits de faible valeur en beaucoup plus grandes quantités sont simultanément produits (des remblais obtenus par l'extraction). Une affectation sur une base physique affecterait la plus grande part des charges environnementales à ces co-produits alors que le système existe pour produire les diamants et assez peu pour produire les remblais. Les causalités sociales sont donc dans ce cas clairement prépondérantes. Le problème doit à l'heure actuelle être analysé au cas par cas tant qu'une approche générale n'est pas proposée et adoptée par tous. Huppes (1993) remarque que, contrairement à l'opinion générale, les causalités physiques qui peuvent jouer un rôle pour l'affectation en cas de co-traitement, ne peuvent en revanche jouer un rôle lors de l'affectation à des co-produits. La *causalité physique* est en effet fonction du temps. Des données physiques

peuvent influencer les événements ultérieurs, par contre elles ne pourront pas influencer des événements antérieurs. Ainsi, des données physiques décrivant un déchet entrant dans un système peuvent être liées à des flux environnementaux de ce processus : si ce déchet contient des métaux lourds, ceux-ci pourront être émis par le processus qui traite ce déchet ou bien par un autre processus en aval. Par contre des données physiques décrivant les produits fabriqués par un processus ne sont pas forcément liées aux flux environnementaux de ce processus. Ce lien avec le temps n'est plus vrai dans le cas des causalités sociales. Un processus existe pour créer de la valeur, et les flux environnementaux de ce processus sont liés aussi bien à la valeur des entrants que des sortants.

2.5. Résolution basée sur une démarche arbitraire

Cette démarche consiste à affecter la part des émissions de flux environnementaux à chaque fonction sur la base de quantités physiques ou de nombres choisis de façon arbitraire. C'est ce qui se fait généralement en ACV. Considérons le cas d'un centre d'enfouissement technique des déchets (sans récupération d'énergie-biogaz) traitant simultanément de nombreux déchets. Chaque déchet qui entre dans la décharge est relié à des fonctions de traitement. Supposons que cette décharge émette différents polluants gazeux dans l'atmosphère. On affecte, par exemple, ces émissions de polluants gazeux au prorata de la masse de chaque déchet entrant dans la décharge. On peut aussi affecter, de façon arbitraire, ces émissions, de façon égale à chaque déchet entrant. Une autre approche, proposée par Postlethwaite (1994), consiste à affecter toutes les émissions de flux environnementaux d'un système remplissant plusieurs fonctions à la fonction principale du système. Dans l'exemple précédent, ces démarches arbitraires ne sont pas adaptées. Il vaut mieux dans ce cas affecter les émissions de polluants gazeux aux déchets entrant la décharge qui en contiennent en analysant les causalités physiques. L'affectation par une démarche arbitraire a cependant souvent l'avantage de la simplicité. Elle est potentiellement correcte lorsqu'elle rejoint les résultats obtenus par des raisonnements plus proches de la réalité causale. En affectant les impacts du système aux différentes fonctions, *on ne tient pas compte des implications au niveau d'autres systèmes*. En effet, pour les cas de fonctions physiques (traitement des déchets ou génération de produits) les entités physiques continuent leur vie, ce qui influence par ce biais, d'autres systèmes.

3. Suivi des impacts au moyen de la construction d'un arbre des procédés

- **Notion de système** : Nous appelons « système » toute activité humaine relativement individualisable, qui se détache de son contexte ou de son milieu tout en procédant à des échanges de matière et d'énergie avec son environnement. Un système est défini par ses limites,

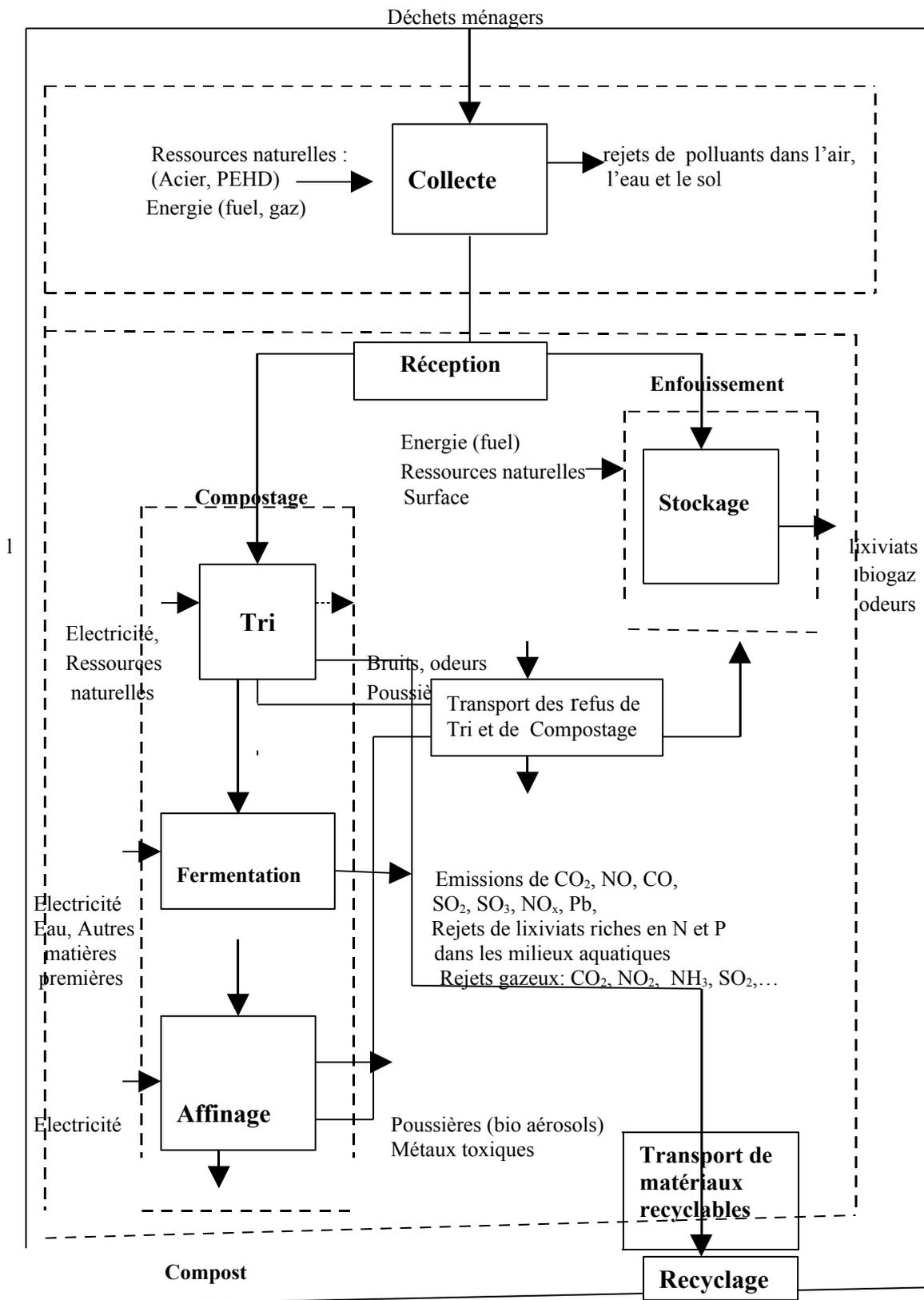
spatiales et temporelles, par ses composantes et par une unité fonctionnelle. En d'autres termes, déterminé à partir de la fonction étudiée, c'est l'ensemble de toutes les opérations se rapportant selon les cas à un produit, un service ou une activité et aux frontières desquelles sont recensés les flux apparaissant dans l'inventaire.

- **Notion d'unité fonctionnelle** : La fonction joue un rôle central car c'est en la définissant correctement qu'il est possible de juger les performances respectives de deux filières de collecte et de traitement. Pour cela, il faut d'abord leur associer des fonctions identiques. Une bonne définition de la fonction permet également de définir correctement les frontières à l'étude. Exemple de fonction : traiter et éliminer les déchets ménagers d'une ville dont la quantité (en tonne par an) et la composition (papiers, plastiques,...) sont définies par l'utilisateur. Pour caractériser le résultat attendu lié à la fonction étudiée, on utilise ce qu'on appelle « unité fonctionnelle » qui est la référence à laquelle sont rapportées les quantités mentionnées dans l'inventaire. Aussi, l'unité fonctionnelle est utilisée pour définir l'opération d'un système. Elle consiste à mesurer quantitativement la fonction. En outre, c'est à partir de cette unité qu'il peut être possible de comparer des scénarios a priori différents. Enfin, une telle comparaison doit-elle prendre en compte tous les impacts, depuis les étapes de collecte chez les ménages jusqu'à leur devenir « ultime » dans les centres de traitement. Comme toute unité, l'unité fonctionnelle se doit d'être précise, mesurable et additive.

La caractérisation du système de compostage – enfouissement se fait par la définition de ses frontières tant spatiales que temporelles, mais également par la description de l'ensemble des opérations qui ont lieu à l'intérieur de ce système. On va faire cette description en dressant un arbre des procédés et en subdivisant ensuite le système global en un ensemble de sous systèmes. Chaque sous système comprend une ou plusieurs opérations de l'arbre des procédés et représente une étape ou une activité que l'on souhaite isoler à cause de ses enjeux environnementaux qui lui sont associés. Cependant, la détermination des frontières du système n'est pas aisée, en particulier dans le cas du traitement des déchets lorsqu'il s'agit de déterminer les processus qu'il serait possible de négliger. En effet, tout ce qui est négligé devrait au préalable faire l'objet d'une justification car l'on ignore souvent ce qui est négligeable tant qu'il n'a pas encore été étudié.

1° Limites du système principal combinant le compostage et la décharge

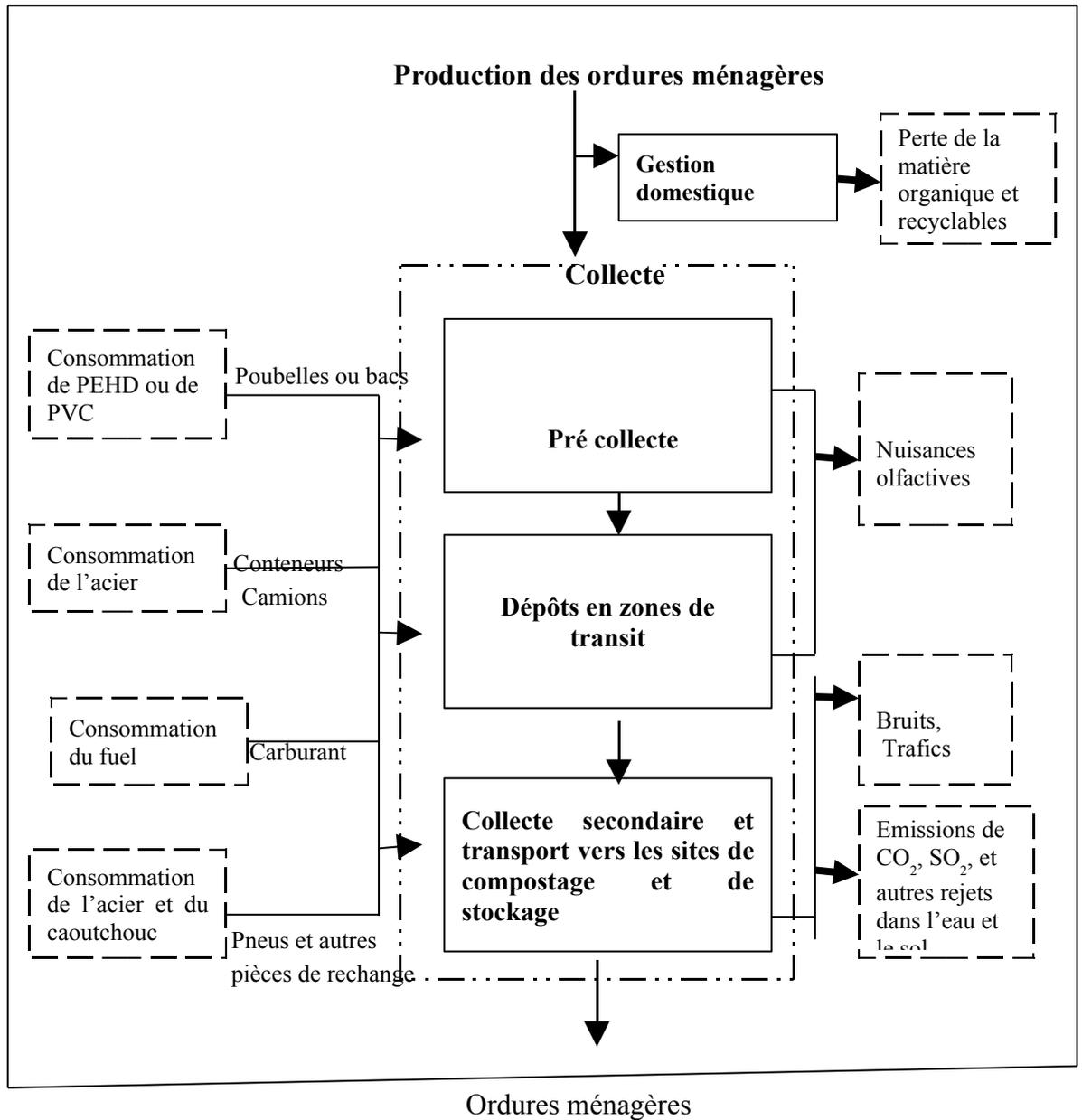
Figure 3 : Limites du système général incluant à la fois le compostage et l'enfouissement



Source : Auteur

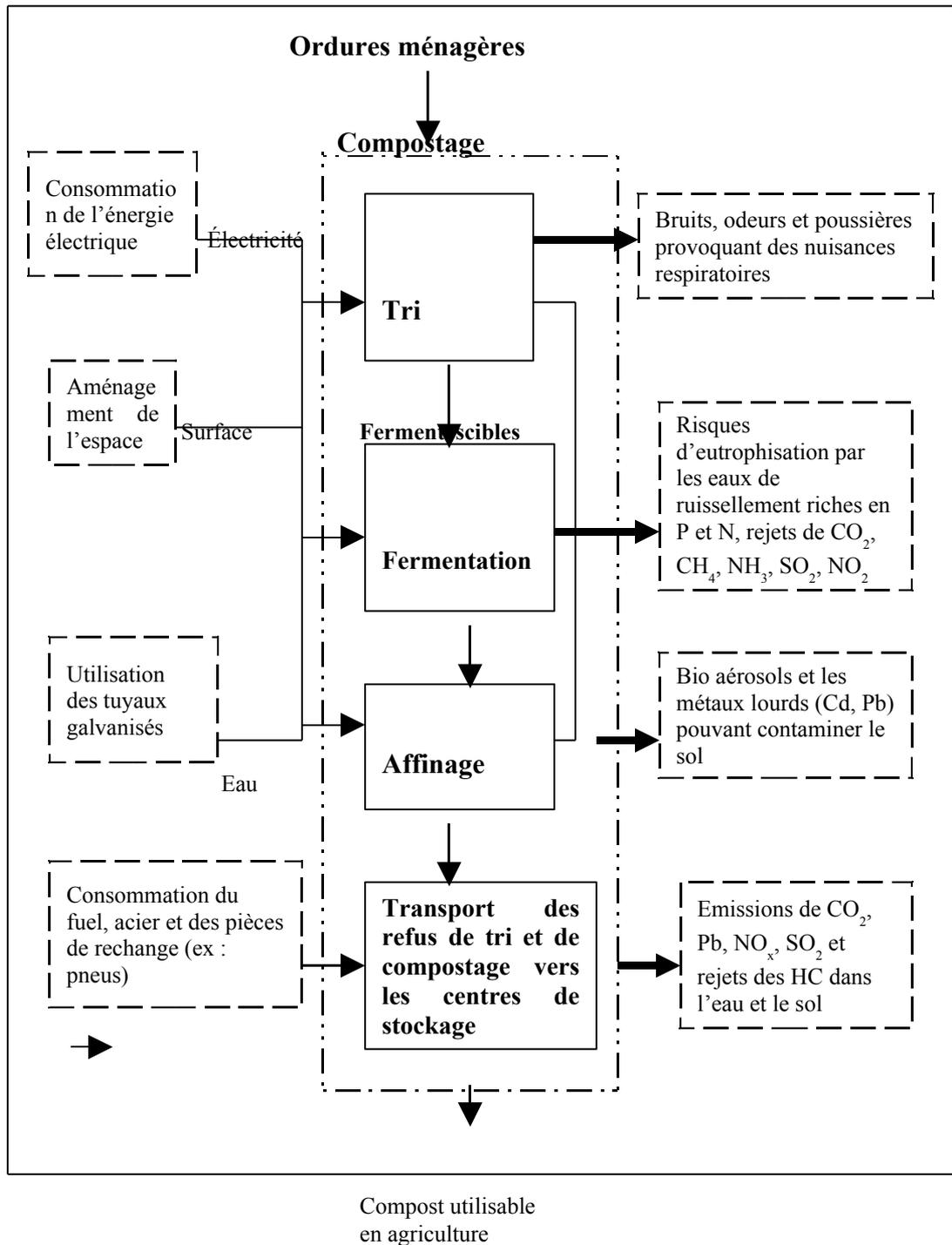
2° Délimitation des frontières des sous-systèmes

Figure4 : Limites du sous-système de collecte des ordures ménagères



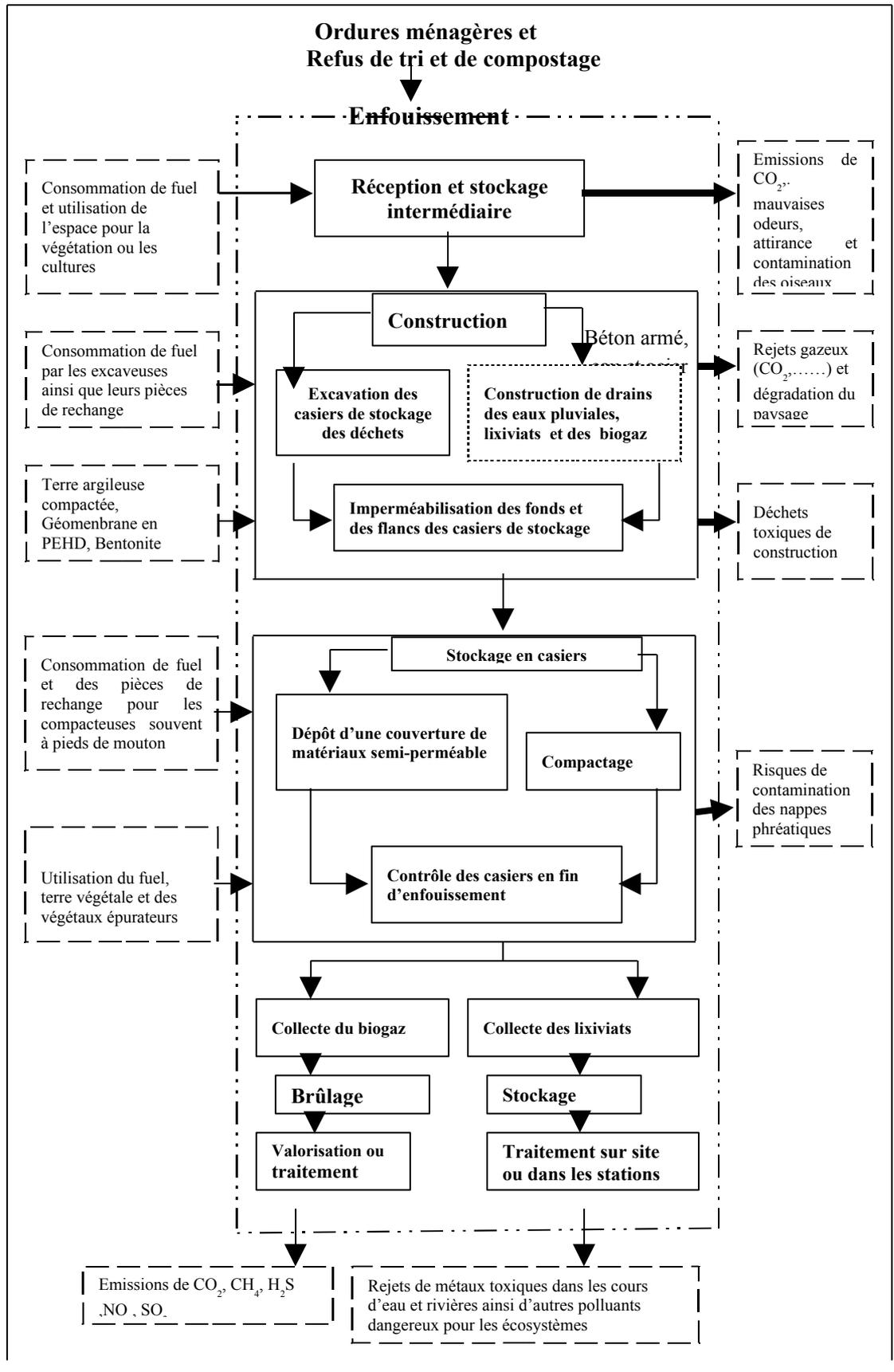
Source : Auteur

Figure 5 : Limites du sous-système de compostage des ordures ménagères



Source :Auteur

Figure 6 : Limites du sous-système de stockage des déchets incluant les refus de tri et de compostage



Source : auteur

5. Interprétation des systèmes

Les systèmes présentés peuvent être utilisés pour comparer des gammes de solutions en vue d'améliorer et rationaliser les procédés de traitement des déchets ménagers par compostage et enfouissement mis en place dans les pays en développement, ceux du sud en particulier. Pour chacune de ces deux filières, il est possible de prévoir la consommation d'énergie, les émissions dans les airs, dans l'eau ou le sol, le volume nécessaire à la mise en décharge des refus de traitement par compostage et même le coût global. A partir de ces systèmes, il est aussi possible de calculer les quantités de sous-produits générés par chaque sous système, tels que les matières récupérées, le compost ou l'énergie, et fournir des éléments de réponse quant à la capacité des débouchés envisagés. Il faut aussi souligner que le système ne détermine pas quelle est la meilleure filière du point de vue de l'environnement. Le choix de telle ou telle option est le reflet des priorités et des besoins locaux ou les stratégies nationales propres à chaque pays. Les systèmes fournissent des lumières à partir desquelles ces décisions et ces choix peuvent être effectués pour évoluer vers un développement durable dans la gestion des déchets ménagers. Enfin, on peut aussi identifier à partir de ces systèmes, celui qui engendre moins de fonctions inutiles c'est-à-dire moins de fonctions liées à la production des émissions dans l'environnement entre le compostage et la décharge. L'on constate que c'est plutôt la mise en décharge qui accuse beaucoup de fonctions polluantes pour l'environnement. En effet, ces fonctions sont liées à la production des quantités importantes de biogaz et de lixiviats durant des centaines et des centaines d'années. Ces rejets affectent à la fois l'atmosphère, la lithosphère, la biosphère, bref tous les compartiments du milieu de vie.

Chapitre VI. Comment adapter l'ACV aux principales filières de gestion des déchets solides et au contexte des PED ?

1. Contexte et justification de la nécessité d'utiliser l'ACV dans les PED

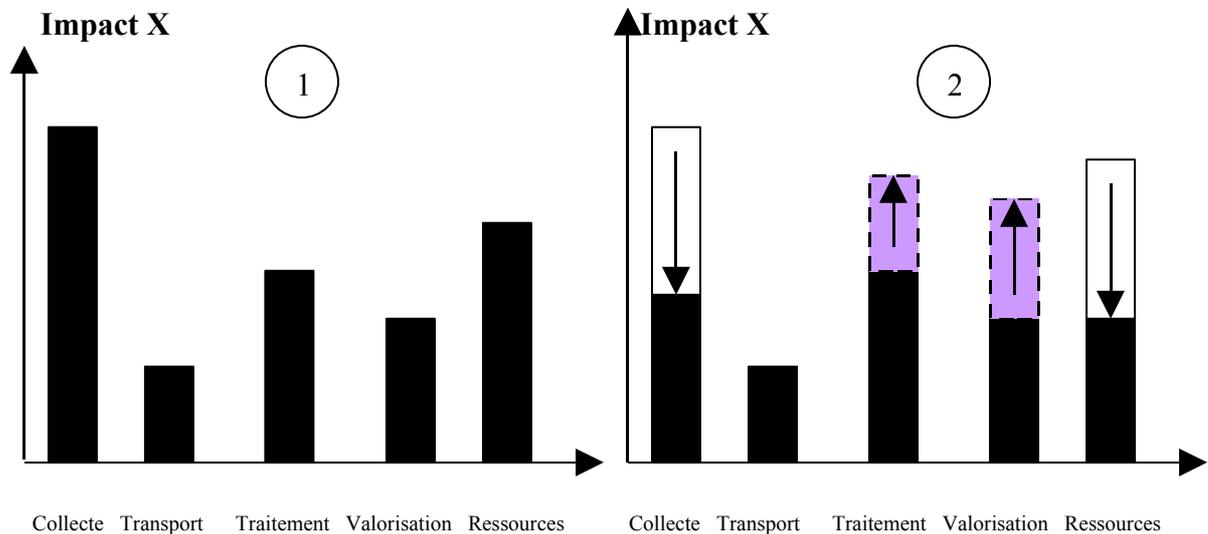
L'objectif est d'indiquer comment et pourquoi il est possible pour les pays en développement d'utiliser la méthode d'analyse du cycle de vie comme un outil d'aide à la prise de décisions en matière de gestion des déchets ménagers en fonction des atouts disponibles et favorables à ce genre d'outil. En effet, pour prendre ces décisions, il faut avoir des informations fiables sur leurs impacts et sur leurs conséquences sur l'environnement et l'écosystème. Or, les gestionnaires des déchets dans les pays en développement ne disposent pas encore d'un système intégré et fiable d'aide à la décision. Pourtant, comme n'importe quel procédé industriel, toutes les activités relatives aux modes de traitement des déchets ménagers se traduisent par une perturbation de l'environnement, que l'on caractérise par des impacts potentiels. On évalue la nature et la quantité de substances émises par une activité donnée et qui, après un certain trajet, peuvent atteindre une cible et provoquer un impact. Par exemple, le déplacement d'un véhicule émet des gaz polluants qui auront un impact sur les poumons des hommes, les feuilles des arbres et sur la qualité de l'air. L'enjeu majeur de l'utilisation de l'ACV est d'identifier les principales sources d'impacts environnementaux et d'éviter ou, le cas échéant, d'arbitrer les déplacements de pollutions liés aux différentes alternatives envisagées dans le traitement des déchets. Ainsi, l'utilisation de l'Analyse du Cycle Vie peut aider les gestionnaires de déchets des villes africaines à accroître leurs connaissances en matière des méthodes d'identification des principales espèces chimiques qui ont un impact notable sur l'environnement en vue d'être capable de préciser et de quantifier les conséquences environnementales associées aux opérations de gestion des déchets ménagers car :

- Toutes les actions déjà existantes dans les PED et visant à réduire ou à éliminer les différents types de pollution engendrée par les déchets peuvent toujours entraîner l'augmentation d'une pollution d'un autre type ; raison pour laquelle il faut maîtriser ces déplacements de pollution en adoptant une vision globale des impacts sur l'environnement.

- En outre, il faut faire une approche intégrée car ces actions d'élimination des déchets peuvent générer en une étape donnée d'un système de gestion, ailleurs et indirectement d'autres pollutions non contrôlées. En effet, quelquefois les améliorations au niveau du processus peuvent ne pas résoudre le problème mais le déplacer. C'est ce qui arrive souvent, par exemple, lorsque le problème posé par un déchet est « résolu » en envoyant ce déchet ailleurs sans s'assurer de son traitement correct.. Le schéma ci-dessous illustre cette notion de transfert de

pollution d'une étape du cycle de vie à une autre, transfert qui peut être révélé par une telle analyse d'ACV :

Figure7 : Exemple de transfert de pollution d'une étape du cycle de vie à une autre



Source : auteur

La figure montre que l'impact majeur est généré au niveau de la collecte. Dans ce cas de figure, on remarque qu'en diminuant par exemple cet impact au niveau de la collecte, on l'augmente au niveau des étapes de traitement et de valorisation.

- Enfin, éliminer ou traiter les déchets, c'est employer des ressources naturelles surtout non renouvelables ou rares et contribuer par conséquent aux déséquilibres environnementaux au niveau global tels que l'épuisement des ressources, l'effet de serre, pluies acides etc....; et il faut alors prendre en considération, outre les pollutions locales classiques, ces autres facteurs sur l'environnement ; d'où la nécessité de faire une description complète des problèmes environnementaux.

L'application de l'ACV à la comparaison de scénarios globaux de gestion de l'ensemble du gisement d'une collectivité peut permettre d'identifier les principales contributions aux impacts et d'orienter les réflexions en situant les étapes ou impacts sur lesquels existent les principales marges de progrès. Elle peut ainsi mettre en lumière le fait que parmi plusieurs actions d'optimisation possibles, certaines présentent des enjeux largement supérieures à d'autres. Ainsi, ce type d'analyse peut permettre de contribuer à établir des priorités d'actions au regard des enjeux qu'elles présentent. L'ACV peut également être utilisée dans le cadre du choix entre plusieurs possibilités sur des domaines ponctuels, concernant par exemple uniquement une partie du gisement (par exemple fractions résiduelles après collectes sélectives, biodéchets des déchets ménagers), une étape spécifique (mode de transport entre le centre de transfert et le centre de traitement,..), ou un aspect très ponctuel (choix du type de contenants de collecte).

Dans de tels cas, l'analyse du cycle de vie ne permet pas forcément d'identifier les principales marges de progrès possibles, mais plutôt d'éclairer les choix des meilleures technologies disponibles sous l'angle environnemental. L'application de cette méthode après la prise de décision permet quant à elle de mettre en lumière le chemin parcouru et les progrès environnementaux réalisés suite aux décisions prises. L'ACV permet alors de contribuer à la communication et à l'illustration de la pertinence des actions mises en œuvre.

2. De « la tombe à la réincarnation »

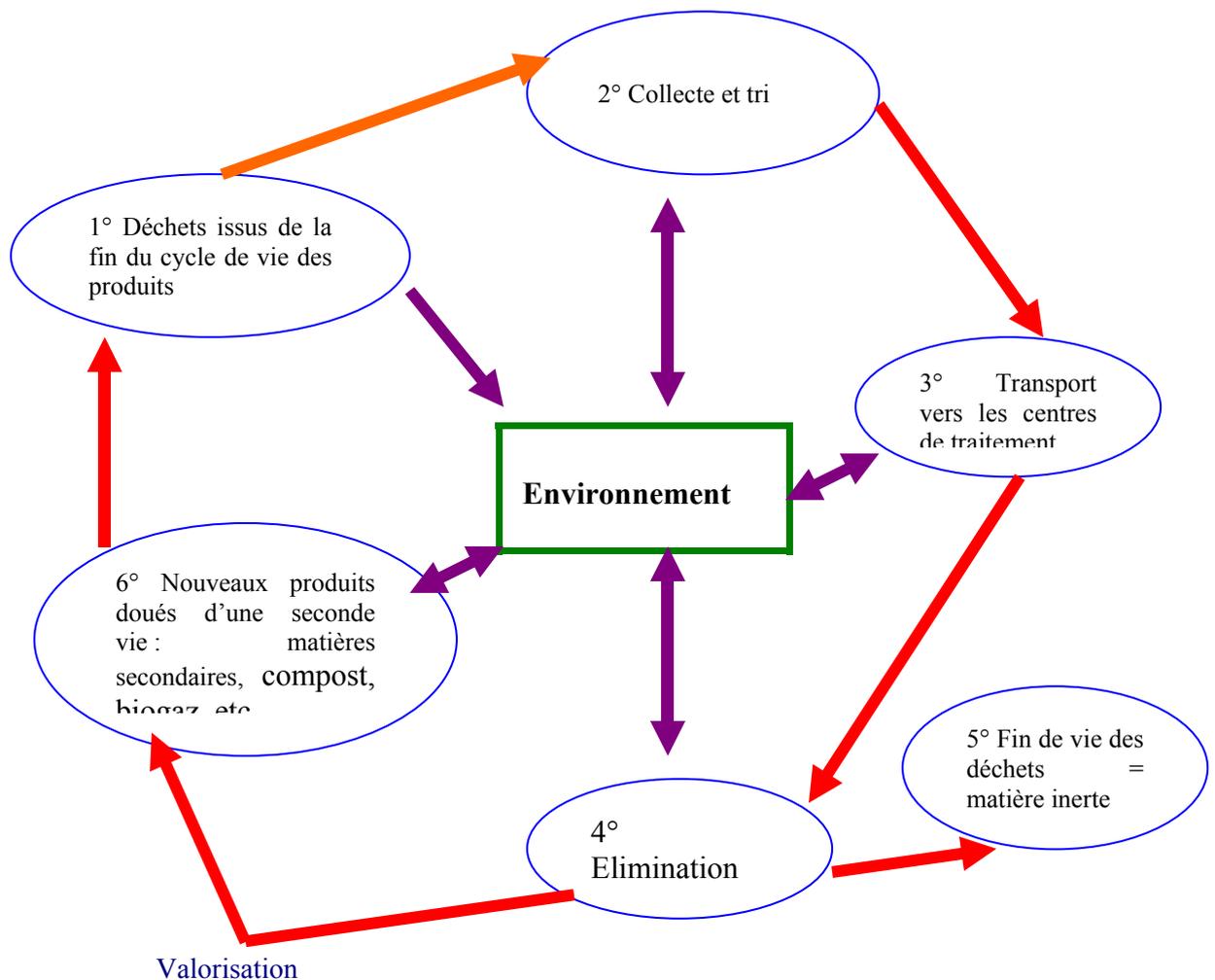
Signalons d'abord que l'analyse du cycle de vie appliquée au système de gestion des déchets rentre dans le cadre des analyses de cycle de vie des services. Dans ce contexte, l'analyse du cycle de vie prend en compte les différentes étapes du service de gestion des déchets. Par conséquent, l'analyse du cycle de vie appliquée au service de traitement des déchets ménagers devient ou constitue un outil efficace qui permet aux gestionnaires des déchets de mieux apprécier la dimension environnementale de leurs choix. Ainsi, l'application de l'écobilan au système de gestion des déchets ménagers consiste à étudier et à comparer les moyens mis en œuvre en vue de comptabiliser les effets et les impacts environnementaux induits par les opérations de collecte, de transport, de traitement au niveau des sites ainsi que la consommation de l'énergie par les camions de transport des déchets vers les unités de traitement. En outre, les déchets ne sont pas à l'origine de l'existence des processus qui les ont générés. De manière plus précise, l'analyse du cycle de vie devra être utilisée dans ce cadre pour :

- optimiser le cycle de vie du service de gestion des déchets au cours de leurs phases de collecte et de traitement tout en précisant non seulement là où se situent les impacts les plus déterminant sur l'environnement mais aussi en cherchant à proposer des mesures de maîtrise et de réduction de ceux-ci.
- Anticiper et prévenir le transfert des problèmes car en prenant en considération toutes les étapes et phases du cycle de vie, l'analyse du cycle de vie permettra aux gestionnaires des déchets de s'assurer que les améliorations réalisées sur une étape particulière du cycle ne conduiront pas à des détériorations encore plus importantes à d'autres endroits et donc à un déplacement du problème.

Cependant, dans le domaine de la gestion des déchets, l'analyse du cycle de vie ne devrait pas s'intéresser au cycle de vie antérieur des produits ou de leurs emballages qui aboutissent à des déchets. Elle devrait considérer uniquement les manières dont les déchets peuvent être collectés et traités une fois qu'ils sont produits. Ainsi, à la différence du cas général du cycle de vie d'un produit où l'analyse du cycle de vie est menée « *du berceau à la tombe* », dans le domaine de la gestion des déchets ménagers, l'analyse du cycle de vie devrait plutôt être menée « *de la tombe*

à la réincarnation ». Cela signifie que l'analyse du cycle de vie partirait d'une certaine quantité de déchets issus de la fin de vie d'un produit, de composition bien déterminée, en passant notamment par les étapes de collecte et de traitement de ces déchets jusqu'à leur transformation complète en nouveaux produits non nocifs pour l'environnement selon le schéma ci-dessous :

Figure 8 : ACV des déchets solides menée de la tombe à la réincarnation



Source : Auteur

Si l'on souhaite regarder de plus près comment les produits auraient été fabriqués au départ, il nous faudrait utiliser une analyse du cycle de vie dans un autre champ d'application spécifique à l'étude d'analyse des procédés de fabrication des produits et des emballages. Ce type d'analyse du cycle de vie inclurait le choix des matériaux, les efforts à réaliser pour minimiser la production des déchets comme la réduction du poids des emballages ou la concentration des produits. Dans ce cas, cette ACV ne serait pas destinée à ceux dont la responsabilité est directement liée à la gestion des déchets, c'est - à dire les municipalités, les autorités locales et

les gouvernements en vue de les aider à optimiser les filières déjà existant ou qu'ils seront amenés à mettre en place, mais plutôt aux fabricants des produits et aux concepteurs d'emballages en vue de les aider à proposer à leurs consommateurs un service plus respectueux de l'environnement du point de vue de la consommation d'énergie et de ressources.

3. Séparation des approches de responsabilité d'analyse verticale et horizontale

La composition des déchets ménagers dans les PED est passée aujourd'hui du profil organique (déchets alimentaires) à des matériaux complexes (produits en fin de vie, plastiques, emballages, etc) qui présentent des risques majeurs pour la santé et l'environnement. Le problème majeur est que la nature ne sait plus détruire certains de ces déchets et si ces derniers sont abandonnés dans la nature, l'environnement est exposé à risques de pollution. Il en résulte que la gestion des déchets ménagers se situe au confluent des activités économiques de production et des impératifs de protection du cadre de vie des populations. Malheureusement, beaucoup de ces déchets sont issus des produits de consommation importés de l'extérieur. Face à cette situation, les pays en développement devraient concentrer beaucoup plus leurs efforts sur ce qu'on pourrait appeler « *analyse horizontale* », où ce sont les industriels locaux du déchet, les collectivités et les législateurs qui chercheraient à optimiser leur approche de gestion des déchets ménagers. Toutefois, pour des raisons d'équité et de partage des coûts et des charges pour l'environnement, les pays industrialisés devraient eux aussi insister à leur tour sur « *l'analyse verticale* » où ce sont les concepteurs et les fabricants qui chercheraient à optimiser les performances ou cycles de vie de leurs produits ou de leurs emballages. Si les deux approches d'optimisation sont faites à la fois, il en résulterait une optimisation globale pour l'environnement.

4. Prise en compte de la dimension sociale

Un des domaines important du développement durable est le service de gestion des déchets, qui a l'avantage de concerner directement le citoyen, à la fois en tant que producteur et victime de nuisances. C'est ce qui pourrait justifier la nécessité de prendre en compte les impacts sociaux dans la méthodologie de l'ACV car chaque service, qu'il soit public ou privé est un processus social (pas seulement un enjeu environnemental) qui met en jeu des acteurs sociaux. Malheureusement, le constat que l'on peut faire suite à l'analyse des méthodes d'évaluation d'impacts associés à la gestion des déchets est l'absence des impacts sociaux dans les méthodes d'évaluation d'impacts au sein de l'ACV alors que toute activité environnementale ou économique de gestion des déchets est incrustée dans la société qui l'influence. L'absence d'évaluation sociale explique que le processus d'évaluation des impacts n'adopte pas une

approche participative qui pourrait inclure les populations concernées par les impacts sociaux. Aujourd'hui, l'on retrouve peu d'exemple qui prennent en compte la dimension sociale du développement durable dans l'approche traditionnelle d'évaluation des scénarios de gestion des déchets car cette dernière ne se concentre que sur l'aspect environnemental, que ce soit par le biais d'une étude d'impacts, d'une étude de risques ou encore d'une ACV. La principale dimension couverte par cet outil est l'environnement ; d'où l'ACV se relève fondamentalement comme un outil de gestion environnementale. Finalement, l'aspect le moins abordé dans le cadre de l'ACV est donc la composante sociale lors de l'évaluation des impacts.

Ainsi, la prise en compte des aspects sociaux dans la gestion des déchets consisterait à sensibiliser et à former les collectivités aux bonnes pratiques de réduction et de tri à la source en vue d'approfondir la prise de conscience sociale des réalités de la gestion des déchets. Cette façon de faire permettrait de résoudre les problèmes d'acceptation de certaines filières de traitement par les populations riveraines ainsi que le changement du comportement des ménages relatif à la mauvaise appréhension psychologique des déchets car les ménages des PED tout comme n'importe quel public, ont souvent une image négative envers les déchets qu'ils associent à la toxicité, à la pollution et à toute sorte de nuisances. Dans ce cas, il faudrait que les collectivités soient informées régulièrement sur les résultats du tri et des valorisations. En d'autres termes, il s'agirait de la mise en place d'un service de gestion des déchets socialement acceptable et techniquement accessible.

Au point de vue social, le foncier par exemple présente certaines spécificités parmi les autres types de ressources naturelles dans les pays en développement. Dans la pratique générale de l'analyse de cycle de vie (ACV), la consommation d'espace est prise en considération, mais la plupart des auteurs se bornent à une indication en terme de surface mobilisée, soit un traitement très fruste. Certains auteurs ont développé des analyses des divers impacts ou effets environnementaux associés à des usages du sol ; mais on bascule alors dans «l'analyse environnementale ». En effet, l'espace est source d'utilité, privée et sociale ; mais cela signifie qu'une réduction de consommation d'espace, pour assurer une même fonction ou une même utilité, génèrerait un gain social surtout dans le cas du traitement des déchets. L'objet de ce point n'est pas de décrire et analyser les divers impacts sociaux associés à des usages du sol, mais à inviter les praticiens de l'ACV des déchets à intégrer dans l'évaluation des impacts, les effets ou les coûts sociaux résultant de la mobilisation de l'espace et des comportements sociaux – culturels des populations des PED.

Chapitre VII. Description et caractérisation des impacts environnementaux du compostage et de la décharge

1. Terminologie relative à la notion d'impact environnemental

Selon le dictionnaire Le Petit Larousse 2003, le mot « *Impact* vient du nom latin *impactus* (=heurter) traduisant l'effet produit par quelque chose». Certains auteurs utilisent indistinctement les termes d'impact, d'effet ou encore d'incidence environnementale pour désigner les conséquences des activités humaines sur le milieu environnant. Pour plus de clarté, en particulier en raison de l'ambiguïté qui existe entre les termes impact et effet, une certaine terminologie est actuellement utilisée pour mettre en évidence les relations entre une (des) source(s) et un (des) impact(s) :

Source : une source est un élément physique du système, qui en raison des processus dont elle est le siège, exerce une influence sur l'environnement pendant le cycle de vie du système. Les centres de compostage et de stockage sont des éléments de traitement des déchets qui sont susceptibles de déverser des lixiviats dans une rivière. D'un point de vue systémique, les sources correspondent aux processus et font partie du système opérant.

Facteur d'impacts (ou charges) : un facteur d'impact est un bien tangible (substance chimique, ressource, matière, ...) dont la variation de sa quantité (concentration, volume, masse,...) se traduit par une modification de la qualité de l'environnement. Un facteur d'impacts peut être exporté (émis) dans l'environnement ou importé (consommé) depuis l'environnement, par une source. Par exemple, le rejet des eaux contenant entre autres des nitrates et des phosphates entraîne l'augmentation de la concentration de ces deux substances dans une rivière et diminuera par conséquent la qualité de cette ressource. Ces substances émises sont des facteurs d'impacts et leur flux correspond aux interactions entre le système et son environnement.

Effet : un effet environnemental est le résultat du rejet ou du prélèvement d'un facteur d'impacts. Il existe entre les sources, les facteurs d'impacts et les effets des relations causales régies par des processus physiques, chimiques ou biologiques. Les mécanismes en jeu modifient les caractéristiques de l'environnement. Parfois, les phénomènes physiques liés à l'environnement sont tels que des effets primaires entraînent des effets secondaires, également dans une relation de cause à effet. L'introduction par exemple de nitrates et de phosphates dans l'eau entraîne l'augmentation de leurs concentrations ce qui, contribue au phénomène d'eutrophisation des lacs et rivières. Une des manifestations de l'eutrophisation sera à terme une

baisse de la concentration en oxygène dissous. La baisse de la concentration en oxygène dissout est un effet secondaire.

Impact : un impact est la conséquence et la signification, pour les cibles réceptrices (êtres humains et écosystèmes), d'un effet environnemental. L'impact se place du point de vue des récepteurs concernés par les effets, et la relation d'effet à impact est délicate à définir. Les impacts peuvent se présenter eux-mêmes en chaînes, formant des séries souvent complexes et encore mal connues. Par exemple, les modifications morphologiques du milieu récepteur liées à l'eutrophisation du milieu conduisent à une disparition de certaines espèces animales et végétales. Les relations entre chaque concept sont multiples et souvent complexes. Une source peut émettre ou consommer plusieurs facteurs d'impacts. Ces mêmes facteurs d'impacts sont, à leur tour, susceptibles de provoquer plusieurs effets et impacts sur l'environnement. L'évaluation de la contribution des différentes sources à un seul impact ou à un groupe d'impacts sur le même milieu (par exemple l'eau) n'est pas toujours réalisable. Il est possible que les données nécessaires à cette évaluation fassent défaut ou que les processus ne soient pas connus pour distinguer les différentes contributions.

2. Inventaire des impacts environnementaux associés au compostage

Le compostage contribue à la lutte contre l'appauvrissement des sols en produisant un amendement organique et limitant ainsi le recours à l'utilisation des engrais chimiques. Cependant, même s'il est vrai que le compostage offre beaucoup d'avantages agronomiques et environnementaux par rapport à d'autres filières de traitement des ordures ménagères, il semble que l'idée selon laquelle cette technique ne présente que des avantages est fautive : il n'est pas sans impacts ou effets négatifs pour l'environnement. En effet, le compostage entraîne des rejets d'éléments qui peuvent poser des problèmes environnementaux. L'ensemble des processus biochimiques du compostage va entraîner la formation de nombreux composés, présentant des impacts négatifs touchant les grands compartiments de la biosphère.

2.1. Impacts sur l'air

La pollution de l'air peut être définie comme tout changement de la composition chimique de l'atmosphère susceptible d'entraîner un effet nocif pour l'homme et l'environnement. Certaines pollutions sont d'origine naturelle comme les éruptions volcaniques ou les incendies des forêts (Sabine Glandier, 2002 ; Patrick Rousseaux, 1993). Mais en général, ce sont les activités humaines qui sont responsables de la dégradation de la qualité de l'air.

Ainsi, évaluer les impacts du compostage sur la qualité de l'air nécessite de définir les principales pollutions atmosphériques liées à l'activité de traitement des déchets ménagers par

cette filière. Ces dernières sont nombreuses et diverses. Elles peuvent être classées selon leur portée et leur fonction :

- à courte et moyenne distances : les gaz malodorants et toxiques, les poussières ; et ces gaz posant essentiellement des problèmes de santé pour l'homme.
- à moyenne (urbaine) et grande (transfrontalière) distances : les gaz dits de redéposition, qui suite à leur émission vont se redéposer dans le milieu naturel et l'enrichir ; ils peuvent être responsables des problèmes de pollution acide et photo - oxydante (smog) ainsi que de l'eutrophisation des milieux aquatiques
- au niveau des 'changements globaux: les gaz à l'origine de la déplétion de l'ozone stratosphérique et de l'aggravation de l'effet de serre, mis en cause dans le phénomène de changement climatique. Les principales émissions responsables de la déperdition en ozone stratosphérique sont des émissions de composés carbonés halogénés : les chlorofluorocarbones (CFC), halons, tétrachlorure de carbone (CCl_4), trichloroéthane, hydrochlorofluorocarbones (HCFC), hydrobromofluorocarbones (HBFC) et bromure de méthyle. Tous ces gaz sont d'origine industrielle (gaz propulseurs, réfrigérant etc.) et ne concernent pas la production du compost par compostage.

1° Gaz à effet de serre

Le dioxyde de carbone (CO_2) : gaz responsable de 60 % de l'augmentation de l'effet de serre ces dernières années, est le principal gaz émis lors du compostage (Joséphine Peigné et al, 2001).

Le méthane (CH_4) : responsable de 15 % de l'augmentation de l'effet de serre, est émis lors de la phase de montée en température. Ce gaz est 20 fois plus puissant que le CO_2 par rapport à son action sur l'effet de serre, son émission doit donc être contrôlée au maximum. La formation du méthane lors du compostage est due à l'action de bactéries thermophiles appelées méthanogènes (Joséphine Peigné et al, 2001). Ces bactéries ont besoin de fortes températures pour se développer et de conditions anoxiques, c'est-à-dire des conditions d'oxygénation nulles. Tout compostage qui s'effectue dans de mauvaises conditions d'aération va produire et émettre du méthane.

Le protoxyde d'azote (N_2O) : gaz responsable de 5 % de l'augmentation de l'effet de serre, peut être émis au début et surtout à la fin du compostage. Ce gaz est formé suite à deux réactions : la nitrification et la dénitrification. La nitrification, transformation de l'azote ammoniacale en nitrate, se déroule en condition de température moyenne ($< 45^\circ\text{C}$) donc au début ou lors de la phase de maturation du compostage. Elle nécessite des conditions aérobies, c'est-à-dire de bonnes conditions d'aération du tas de compost. Inversement, la dénitrification est une réaction qui transforme les nitrates en N_2 . Le protoxyde d'azote (N_2O) est produit si la réaction n'est pas totale. Elle nécessite des conditions anoxiques, comme pour le CH_4 . Lors du compostage, les conditions d'aération à l'intérieur du tas peuvent varier, le N_2O sera alors produit en raison de la présence de ces deux types de réactions.

2° Emissions des gaz dits de redéposition, toxiques et malodorants

- *Le principal gaz émis de ce type est l'ammoniac (NH₃). Ce gaz va se redéposer aux alentours de sa source d'émission et enrichir le sol et les milieux aquatiques en azote. De plus, il joue un rôle dans les mécanismes des pluies acides. Lors du compostage, plus de 50 % de l'azote présent au début peut être émis sous forme de NH₃. Son émission est due à deux facteurs :*

- *La production de NH₄⁺ suite à la dégradation de la matière organique (réaction d'ammonification) et de l'urée (ou acide urique pour les volailles),*
- *La présence de fortes températures et d'un pH basique, conditions favorables à la volatilisation du NH₄⁺ sous forme de NH₃. Ce gaz sera émis lors de la phase de montée en température et après chaque retournement.*

- *Les oxydes d'azote (NO_x), autres que le N₂O, sont aussi des gaz responsables de pluies acides (et destructeur de la couche d'ozone). Ils sont produits lors du compostage, mais le détail de leur formation est moins connu et surtout les quantités émises sont négligeables.*

- *Les gaz toxiques : à travers cette appellation de gaz toxiques, ce sont les composés organiques volatiles (COV) qui sont impliqués. Leur émission dépend du degré d'activité biologique, des conditions d'aération et donc de température. Ces gaz sont le plus souvent problématiques dans les grandes stations de compostage, où leur concentration à proximité des tas peut être dangereuse pour l'homme.*

2.2. Les impacts sur l'eau et le sol

1° Le ruissellement

En général, le compostage est moins nocif pour l'eau que pour l'air. Les éléments perdus par ruissellement ou lessivage sont, le plus souvent, négligeables vis-à-vis des pertes par voie gazeuse. L'ajout de l'eau au cours de l'opération de retournement ou lors de fortes précipitations, l'eau peut ruisseler sur le tas de compost et se charger en éléments nitrates, phosphates (NO₃⁻, PO₃⁻) (Philippe et Peigné, 2001). Seuls les tas à proximité immédiate de sources d'eau seront source de pollution relative à l'eutrophisation. Le principal problème du ruissellement est plus technique qu'environnemental, des flaques d'eau aux abords des tas représentant des obstacles à la manipulation du compost.

2° Le lessivage

Le lessivage a deux origines lors du compostage: les eaux de pluies qui percolent dans le tas et l'eau ajoutée ou formée lors du compostage. Tout comme le ruissellement, les eaux de lessivage sont généralement faiblement chargées en éléments polluants. Le principal problème est lié à l'accumulation d'éléments sous le tas de compost si celui-ci est maintenu à la même place tous les ans. Les teneurs en azote plus ou moins élevées des différents matériaux joueront aussi.

Ainsi, un fumier de volaille par exemple, riche en azote, peut présenter un risque s'il est lessivé lors du compostage. Le potassium (K) est l'élément le plus lessivé pendant le compostage. Bien qu'il ne soit pas considéré comme un polluant, la perte de potentiel de fertilisation peut poser problème. Les écoulements doivent donc être contrôlés.

3. Inventaire des impacts environnementaux induits par la décharge

Les impacts potentiels sur la santé associés à l'activité de gestion ou de traitement des déchets sont peu connus, en particulier dans des centres de stockage d'ordures ménagères. Plusieurs facteurs rendent difficiles leur identification au sein des populations riveraines : concentrations en polluants chimiques dans les milieux environnants (air, eau, sols) très variables ; mélange complexe de produits dont nombreux sont à l'état de traces ; symptômes, susceptibles d'être générés, banals et très peu spécifiques. La composition des émissions gazeuses des décharges varie selon la nature et le volume des déchets stockés, l'âge de la décharge et son mode d'exploitation. Les émissions gazeuses provenant du massif de déchets ont une composition variable d'un site à un autre mais elles contiennent principalement du méthane, du dioxyde de carbone et de l'azote. Ceux-ci sont accompagnés par de nombreux composés volatils à l'état de traces dont certains sont toxiques à de faibles concentrations. Le risque microbien est également à envisager, particulièrement pour les personnes exposées professionnellement. En effet, de nombreux micro-organismes sont potentiellement présents dans les déchets ménagers, qui sont des milieux de culture favorables.

Néanmoins, les exploitants des centres de stockage doivent avoir une maîtrise adaptée de ces deux types d'effluents générés, les lixiviats et le biogaz, car ils sont à l'origine des principaux impacts environnementaux et sanitaires. Les lixiviats sont des eaux chargés de polluants organiques et inorganiques pouvant présenter des effets négatifs pour le sol et l'eau des nappes phréatiques.

1° La production des lixiviats

Les lixiviats sont le résultat de percolation, à travers les déchets, d'eau qui se charge bactériologiquement et chimiquement. Contrairement au biogaz, qui aisément dispersé dans l'atmosphère, les lixiviats, de part leur nature liquide, sont une source concentrée de polluants.

Les lixiviats contiennent de la matière organique, des hydrocarbures, des composés minéraux, des métaux lourds. Leur production varie en fonction de nombreux paramètres tels que la part de la pluie susceptible de s'infiltrer dans les déchets, l'efficacité des dispositifs destinés à éviter les apports d'eau de l'extérieur, la surface exploitée, la présence et la qualité de couvertures de

protection permettant de réduire les infiltrations d'eaux pluviales, la vitesse d'infiltration des eaux à travers les déchets, le pouvoir d'adsorption ou de relargage des déchets ainsi que l'efficacité du système de drainage et d'évacuation des lixiviats. Bien souvent, la production des lixiviats est obtenue en faisant un bilan hydrique du site, à l'aide d'une formule dans laquelle sont entrés les paramètres relatifs aux conditions naturelles et à l'exploitation [ADEME, 2004] :

$$P + E_D + R_1 = I + E + E_{TR} + R_2 \quad \text{où:}$$

- 1- P est le volume des précipitations ;
- 2- E_D est le volume d'eau apporté par les déchets ;
- 3- R_1 est le volume d'eau apporté par ruissellement ;
- 4- I est le volume de lixiviats infiltrés dans le sous-sol à travers le fond de la décharge ;
- 5- E est le volume de lixiviats collectés ;
- 6- E_{TR} est le volume d'eau éliminé par évapotranspiration réelle ;
- 7- R_2 est le volume d'eau exporté de la décharge par ruissellement.

Le volume d'eau apporté par les déchets est très variable et dépend du déchet lui-même.

Toutefois, les ordures ménagères ont plutôt tendance à absorber l'eau qui pénètre dans la décharge ; leur capacité de rétention, déterminée en laboratoire, se situerait entre 0,4 et 0,7 kg/kg d'ordures ménagères brutes (ADEME, 2004).

En quoi les lixiviats sont-ils des vecteurs de pollution ?

Les lixiviats de la plupart des enfouissements contiennent des concentrations en contaminants qui dépassent le critère de qualité pour les eaux de surface et les eaux potables et qui présentent ainsi un risque environnemental élevé (Hjeltnar et al., 1995).

En effet, au contact des lixiviats, les eaux de surface et les eaux souterraines se dégradent chimiquement et bactériologiquement. La pollution des eaux souterraines est le résultat de l'infiltration et de la diffusion de lixiviats en sous-sol perméable ou fissuré. Quant à la pollution des eaux de surface, elle peut résulter du débordement et de l'écoulement des bassins de stockage des lixiviats dans le réseau hydrographique. Ainsi, leur déversement dans les cours d'eau ainsi que les ruisseaux situés près de la décharge peut entraîner la mort d'une multitude d'espèces constituant la faune aquatique dont les poissons par exemple. De plus les métaux lourds présents dans les lixiviats peuvent être à l'origine d'une pollution et avoir de graves répercussions sur la santé. En effet, le plomb et le mercure sont des agents mutagènes et cancérogènes, capables de perturber le développement normal des individus. L'aluminium a des

propriétés neurotoxiques. Le cadmium est susceptible d'engendrer des affections pulmonaires et des troubles rénaux.

En conclusion, on peut dire que le plus grand risque lié à la production de lixiviats est la contamination de la nappe phréatique mais aussi la pollution des sols. Cela aurait pour conséquence de polluer les puits d'eau de consommation et donc de priver la population d'un élément vital à sa survie. Dans le même ordre d'idée, il est nécessaire de ne pas utiliser les lixiviats comme eau de consommation. En cas de consommation d'eau polluée par les lixiviats, les risques encourus sont de graves intoxications pouvant entraîner des maladies irréversibles et la mort. Signalons également que la pollution des réserves d'eau potable par des micro-organismes pathogène peut provoquer des épidémies. Au-delà de ces considérations, les lixiviats doivent être traité comme des substances extrêmement dangereuses. Il est nécessaire d'en organiser la collecte et le traitement afin de limiter au maximum les conséquences sur l'environnement et la santé.

2° Effets des composés azotés

L'azote est probablement l'un des éléments les plus importants dans la nature. Cet intérêt vient du fait que l'azote peut se retrouver au total sous 7 états de valence différents. Le contrôle des composés azotés est devenu très strict dans le domaine des eaux usées, et particulièrement dans celui des lixiviats issus des centres de stockage des déchets qui constituent, à cause de leur toxicité, une menace pour l'aquifère (Ross et al., 1989 ; Burton et al., 1997). Des règlements sur le rejet des composés azotés ont donc été mis en place dans de nombreux pays. Des analyses de lixiviats montrent que 75% de l'azote total consiste en de l'ammoniaque (Bae et al., 1997). Bien qu'il soit un nutriment essentiel pour la synthèse cellulaire des micro-organismes, il exerce une forte demande en oxygène, et est toxique pour les poissons à des concentrations au-dessus de 0,5 mg/l. Une nitrification incontrôlée conduit à la production de nitrites qui sont extrêmement toxiques à des concentrations aussi faibles que 0,1 mg/l d'azote (Forteath, 1991). Les nitrites sont également indésirables dans l'eau potable car ils peuvent réagir avec les amines pour former des nitrosamines, substances potentiellement cancérigènes (Klein, 1995). Enfin, des concentrations en nitrates trop élevées sont responsables de l'eutrophisation des lacs. Elles peuvent être toxiques pour de nombreuses espèces aquatiques et incidemment pour l'homme puisque les nitrates peuvent provoquer de l'hypertension et même des cas de cancer à l'estomac (Beg et al, 1997).

3° La production du biogaz

Le biogaz est un mélange gazeux hétérogène et évolutif qui résulte de la dégradation de la matière organique. Par conséquent, il est caractéristique des centres de stockage de déchets non dangereux. Sa composition chimique est très variable et dépend de nombreux paramètres comme la nature des déchets entrants, les conditions de mise en décharge (le taux de compactage), la composition des déchets, l'humidité, la température, etc. Dans les conditions

anaérobies, il est constitué de 40 à 60% de méthane (CH₄), de 35 à 50% de dioxyde de carbone (CO₂), de sulfure d'hydrogène (H₂S), du monoxyde de carbone CO, de l'oxygène O₂, de l'azote N₂ et de nombreux autres éléments à l'état de traces. Le méthane (CH₄) et le gaz carbonique (CO₂) sont les deux produits majeurs de la méthanogénèse, étape finale et la plus longue du processus anaérobie.

Le monoxyde de carbone (CO) vient de la dégradation biologique des déchets et est aussi produit lors de combustions réalisées en défaut d'oxygène. L'oxygène, O₂, et l'azote, N₂, ne sont présents que s'il y a infiltration d'air frais dans le cœur de la décharge. L'origine du sulfure d'hydrogène, H₂S, s'explique par la présence simultanée de sulfate (provenant notamment des déchets de construction) et de bactéries sulfato-réductrices. Ces dernières travaillent en compétition avec les bactéries méthanogènes. Outre ces composants majeurs il existe une multitude de substances organiques à l'état de traces. La nature de ces produits est très variée : aldéhydes, cétones, alcools, composés aromatiques, composés halogénés et composés organo-sulfurés. Les origines de ces substances sont les dégradations biologique et chimique des déchets ainsi que le relargage de gaz provenant de la mise en décharge de déchets les contenant : frigos, solvants, aérosols, etc. Leur part dans la production de biogaz est faible et leurs proportions relatives sont très variables.

Le biogaz est malodorant, combustible, explosif et contribue à l'augmentation de l'effet de serre. La production du biogaz dans les centres de stockage s'étend sur plusieurs années, pouvant atteindre cinquante ans. Aussi, l'impact du biogaz sur la santé des populations vivant à proximité d'une décharge a été étudié par le cancérologue Dr Pluygers : sur la centaine de personnes étudiées, il a décelé une diminution des défenses immunitaires et donc une disposition accrue à développer un cancer (AHLLN, 2006). Le biogaz, constitué en partie de composés nocifs dont certains peuvent se révéler toxiques et/ou cancérigènes, contribuerait au déclenchement de ces symptômes. D'autres études établissent à priori une relation entre le fait de vivre à proximité d'une décharge et le développement de cancers. Notamment, celle de Goldberg et ses collaborateurs citée par le CNIID en 2001, met en évidence une incidence plus élevée des cancers du poumon, de l'estomac et des voies biliaires intrahépatiques chez les riverains d'une décharge municipale.

En conclusion, la mise en décharge surtout non contrôlée des déchets ne semble pas être une solution totalement fiable vis - à - vis de la protection de l'environnement et de la santé humaine.

4. Méthodes de caractérisation des impacts environnementaux

Comme signalé dans la partie introductive, il existe différentes méthodes d'évaluation des impacts associés aux pratiques de gestion et de traitement des déchets ménagers sur l'environnement ou sur l'un de ses compartiments. Ainsi, l'évaluation de ces impacts requiert au préalable de répondre à un ensemble de questions : Quels sont les polluants concernés ? Quelles sont les pratiques à prendre en compte ? Quel est l'outil le mieux adapté pour répondre à ces objectifs ? Cependant, il n'existe pas encore de méthodologie acceptable et acceptée en matière d'évaluation des impacts. Ce travail se limitera à évoquer certains aspects intéressants dans le cadre de notre démarche d'analyse du compostage et de la décharge

4.1. Description des catégories

L'ACV part toujours d'une activité humaine, détermine les procédés polluants associés, inventorie et quantifie les flux élémentaires émis puis les classe et les rapporte à l'unité du type de pollution (exemple g.éq.CO₂ pour l'effet de serre). Cependant, l'ACV ne vise pas à couvrir l'ensemble de la problématique environnementale : seul ce qui est quantitatif (mesurable), et extensif (sommable), est pris en compte. De même, les intermédiaires et finaux ne sont pas quantifiés sauf via des méthodologies complémentaires comme Eco-Indicateur99, Eco-points ou la monétarisation. La démarche de calcul des indicateurs d'impacts potentiels sur l'environnement a été prise de la méthodologie même de l'analyse du cycle de vie. Afin de calculer la valeur chacun de ces indicateurs d'impacts potentiels, le total des émissions d'une substance donnée est multiplié par un facteur d'équivalence (aussi appelé facteur de classification) qui est spécifique pour chaque catégorie d'impacts. De plus, comme deux ou plusieurs substances peuvent se combiner pour produire les mêmes effets sur un indicateur d'impact donné, les impacts potentiels par substance sont additionnés pour chaque catégorie d'impacts.

4.2. Facteurs de caractérisation

La caractérisation consiste à évaluer la contribution de chaque flux environnemental à chaque catégorie d'effet de façon quantitative. La caractérisation de l'impact est une quantification des facteurs d'impacts. La description qualitative et/ou quantitative de l'impact est traduite par des indicateurs d'impact ou des indices opérationnels. Un des buts des chercheurs est de développer ces indicateurs. Tous les facteurs d'impacts doivent être ramenés à l'unité fonctionnelle. L'intérêt de l'utilisation des indicateurs est qu'ils peuvent être appliqués à tous les niveaux et pour n'importe quels enjeux.

Tableau 9 : Inventaire des indicateurs d'impacts associés au compostage et au stockage des déchets ménagers :

1°) Collecte

milieux	Indicateurs d'impacts	Unité de mesure	Substances ou activités responsables	Facteur de caractérisation	Références bibliographiques
Atmosphère	Réchauffement global	Kg CO ₂ . éq	CO ₂ CO H ₂ O	1 2 Pas de facteur	CML, Leiden, 2004
Biosphère	Nuisances olfactives	m ³ d'air vicié	NH ₃ SO ₂	1,88 1	Mendes et al, 2004
Lithosphère	Consommation de l'énergie primaire	MJ	Opérations liées au transport des déchets	Pas de facteur de caractérisation	Heijungs. R, 1992
	Epuisement des ressources abiotiques et rares	Tonne de matière	Fabrication des véhicules et des engins en acier ainsi que des bacs en PEHD	Somme des masses des ressources extraites pondérées par un coefficient qui traduit leur plus ou moins grande rareté	SETAC (1991), A Technical Framework for Life Cycle Assessment, Smugglers Notch Workshop Report, Washington DC, U.S.A.

2°) Compostage

Milieu	Indicateur d'impact	Unité de mesure	Substances ou activités responsables de l'impact	Facteur de caractérisation	Références
Atmosphère	Réchauffement Global (GWP)	Kg CO ₂ éq	CO ₂ CO CH ₄	1,00 2,00 23,00	CML, avril, 2004 Mendes et al. 2004 CML, avril, 2004
	Acidification	Kg SO ₂ éq	SO ₂ NH ₃ H ₂ S NO _x	1,200 1,60 1,88 0,50	Mendes et al, 2004 CML, avril, 2004 ' ' ' ' ' '
Hydrosphère	Eutrophisation	Kg PO ₄ ³⁻ éq	P N NH ₃ (dissous) NO _x (dissous)	3,06 0,42 0,35 0,13	CML, avril, 2004 ' ' ' ' ' ' ' ' '
Lithosphère	Ecotoxicité du sol	Mg/Kg (MS) ou mg Pb éq	Métaux lourds contenus dans le compost (Pb, Cd, Cr, Cu,...)	Fixation des valeurs limites dont Pb : 140 Cu : 75 Cd : 1,5 Cr : 140	Ecolabel européen (94/923/CE)
Biosphère	Toxicité humaine	P-C ₆ H ₄ Cl ₂ éq	Bioaérosols c'est-à-dire émissions des poussières	0,82	CML, avril, 2004
	Odeurs	m ³ d'air vicié	NH ₃	-	Mendès et al, 2004
	Bruits	Décibel	Opérations de tri, criblage et de tamisage	60 (valeur limite)	Cours d'écotoxicologie

4°) Enfouissement

Milieu	Catégorie d'impact	Unité de mesure	Substances ou activités responsables	Facteur de caractérisation	Références
Atmosphère	Réchauffement climatique global (GWP)	Kg CO ₂ .éq	CO ₂ CH ₄ CO N ₂ O CHCl ₃	1,00 23,00 2,00 296,00 30,00	Mendes et al, 2004 CML, avril, 2004 Mendes et al, 2004
	Acidification	Kg SO ₂ .éq	SO ₂ NO _x NH ₃ H ₂ S HF HCl	1,00 0,50 1,60 1,88 1,60 0,88	Mendes et al, 2004 CML, avril, 2004 ‘ ‘ ‘ ‘ ‘ ‘
Hydrosphère	Eutrophisation	Kg PO ₄ ³⁺ éq	COD N P NO _x NH ₃	0,02 0,42 3,06 0,13 0,35	CML, avril, 2004 ‘ ‘ ‘ ‘ ‘ ‘ ‘ ‘ ‘
	Ecotoxicité aquatique des lixiviats	mg/l	Métaux lourds en solution	<15 (valeur limite)	Cours de gestion des déchets, 2006 à Senghor
Biosphère	Toxicité humaine	Kg P- C ₆ H ₄ Cl ₂	CHCl ₃ PCP Halogénures organiques COV non méthaniques Particules NO _x H ₂ S NH ₃ et SO ₂	13,00 7,20 1,00 0,64 0,82 1,20 0,22 0,10 chacun	CML, avril, 2004 ‘ ‘ ‘ ‘ ‘ ‘ ‘ ‘ ‘ ‘ ‘ ‘ ‘ ‘ ‘ ‘ ‘ ‘ ‘ ‘ ‘
	Ozone photochimique (smog)	Kg C ₂ H ₄ .éq	CO SO ₂ COV CH ₄	0,03 0,05 1,00 23	CML, avril, 2004 ‘ ‘ ‘ ‘ ‘ ‘
	Nuisances olfactives	m ³ d'air vicié	Emissions de NH ₃ et SO ₂	-	Heijungs. R, 1992
Lithosphère	Epuisement des ressources abiotiques et rares	Tonne de matière	Extraction de l'acier nécessaire à la fabrication des engins de compactage	Addition des masses des ressources extraites pondérées par un coefficient qui traduit leur plus ou moins grande rareté	SETAC (1991), A Technical Framework for Life Cycle Assessment, Smugglers Notch Workshop Report, Washington DC, U.S.A
	Consommation de l'énergie primaire	Mj	Carburant pour compactage et d'excavation	-	CML, Leiden, 1992
	Consommation de l'espace	Quantité en m ³ de déchets enfouis	Creusement des casiers pour enfouir les déchets	-	Direction de l'enviro. (2004) « Indicateurs clés d'enviro de l'OCDE »

L'inventaire attaché à un déchet dans le cadre de cette étude apporte des éclaircissements sur la manière de comptabiliser les flux matière et énergie (consommation de ressources, de l'énergie, rejets de polluants dans l'air, l'eau et le sol) associés à chaque étape du procédé de collecte ou de traitement. De manière plus précise, l'inventaire est utilisé pour :

- optimiser le cycle de vie de la gestion des déchets ménagers tout en précisant où se situe l'impact déterminant sur l'environnement au cours du cycle ; et on peut donc ensuite chercher à maîtriser et à réduire celui-ci.
- anticiper et prévenir le transfert des problèmes.

Comme il prend en considération toutes les étapes et phases du cycle de vie, l'inventaire permet de s'assurer que des améliorations réalisées sur une étape particulière du cycle ne conduisent pas à des détériorations plus importantes à d'autres endroits ou moments dans le cycle et donc à un déplacement du problème. L'inventaire appliqué à la gestion des déchets ménagers débute au moment où les produits, marchandises ou emballages sont jetés à la poubelle par les ménages, et s'achève lorsqu'ils terminent à l'état de matière inerte dans une décharge, sont rejetés sous forme d'émission atmosphérique ou aquatique voire lorsqu'ils accèdent à une seconde vie (matière secondaire, compost, etc.) et ne constituent plus des déchets. Un inventaire des déchets ménagers est donc une étude d'impacts, une analyse globale du cycle de vie de ces déchets.

4.3. Importance de la connaissance de l'inventaire des indicateurs d'impacts

La connaissance de l'inventaire des indicateurs permet d'évaluer leur contribution à différents effets sur l'environnement et de préciser et expliciter le choix de réduction des impacts.

En effet, si on considère par exemple 100 m^3 ou 72 kg CH_4 soit la production d'environ une tonne de déchets ménagers mis en décharge : Dans le cas d'une *émission directe* dans l'atmosphère, les 72 kg de CH_4 sont émis dans l'atmosphère (ADEME, 1996). Or le CH_4 a un impact 21 fois plus fort que le CO_2 sur l'effet de serre. On a donc l'équivalent de 1656 kg éq. CO_2 relâché dans l'atmosphère. Dans le cas d'une *combustion* en torchère, la réaction chimique de combustion mise en jeu est la suivante :



Dans ce cas, il faut alors faire le rapport molaire pour obtenir la masse de CO_2 émis. On obtient 198 kg éq. CO_2 , soit une *réduction* de 1458 kg éq. CO_2 par rapport à une émission directe du CH_4 .

Dans le cas d'une *valorisation* énergétique, l'utilisation des 100 m^3 de CH_4 permet de dégager une énergie équivalente à 1 MWh . Or, selon l'ADEME (1996), la production de 1 MWh avec

du pétrole émet 86 kg de Carbone soit 315 kg éq. CO₂ (en comparaison on obtient 205 kg éq. avec le gaz naturel et 473 kg éq. CO₂ avec le charbon). Donc la substitution de pétrole par du biogaz permet l'économie de 315 kg éq. CO₂ pour 100 m³ de méthane (3,15 kg éq. CO₂/m³ de CH₄), soit 2 3 % du Potentiel Réchauffement Global.

En réalité, la biomasse qui fermente dans une décharge se sera dégradée en CO₂ quel que soit son devenir. Si l'on compare le système « stockage des déchets » avec le cycle du carbone, il faudrait retrancher les émissions fatales de gaz carbonique. Ces émissions fatales qui ne génèrent pas d'augmentation des gaz à effet de serre correspondent à la situation où tout le biogaz est brûlé en torchère (transformation de tout le carbone compris dans le digestat en CO₂ dans l'atmosphère). Le fait de rejeter le biogaz dans l'atmosphère contribue donc à hauteur de 1458 kg éq. CO₂ dans l'augmentation des gaz à effet de serre, soit un coefficient de 18,25 kg éq. CO₂ par kg CH₄. On parlera de «*Potentiel de Réchauffement Global brut* » lorsque l'on utilise le coefficient de 21, et de «*Potentiel de Réchauffement Global net* » lorsque l'on raisonne par rapport à une autre situation « de référence », avec le coefficient de 18,25 (Céline Lacour, 2004). La combustion en torchère n'augmente pas les émissions de gaz à effet de serre.

Pour la valorisation, il conviendrait de prendre en compte l'ensemble de la filière des combustibles fossiles (extraction, transport...), ce qui augmente l'effet de substitution de l'ordre de 10 %. La valorisation par substitution au fioul représente 21 % du Potentiel de Réchauffement Global « brut », ou 24 % du Potentiel Réchauffement Global « net », c'est à dire qu'en substituant 100 m³ de méthane à du fioul (à même contenu énergétique), l'effet est le même qu'en réduisant les émissions directes de méthane de 24 m³.

Conclusion

« Mieux vaut éclairer une chandelle que de maudire l'obscurité »

Un déchet mieux géré est celui qui n'est pas produit. Ainsi, une gestion écologique des déchets doit aller au-delà de la simple élimination ou récupération des déchets produits et chercher à s'attaquer à la cause première du problème en essayant de changer les modes de production et de consommation qui ne sont pas viables. Cela suppose d'appliquer le concept de gestion intégrée du cycle de vie, qui représente une occasion unique de concilier développement et protection de l'environnement. La gestion des déchets ménagers doit être rationalisée et optimisée en intégrant les objectifs du développement durable en termes économique, environnemental et social. L'analyse du cycle de vie est plus adaptée à l'optimisation des systèmes de gestion intégrée des déchets que l'approche consistant à hiérarchiser les filières de traitement. Il existe aujourd'hui des modèles d'analyse du cycle de vie qui permettent de comparer et d'évaluer les coûts et les charges pour l'environnement des systèmes de gestion des déchets. Nous espérons que les approches d'analyse du cycle des déchets ménagers que nous avons développés pourront aider les gestionnaires à mieux identifier les opérations qui nécessitent le plus grand potentiel d'améliorations. Les pays du sud devraient reconnaître le rôle important de l'analyse du cycle de vie pour le succès de la mise en place de nouveaux procédés de traitement et destination finale des déchets ménagers, et de la législation concernant les déchets, dont le succès dépendra, en grande partie, de l'engagement de la population et des acteurs avec des responsabilités dans ce domaine notamment dans la réduction de la production de déchets, la diminution de leur toxicité et dans la mise en place de la réutilisation et la collecte sélective pour le recyclage. Il n'y a pas de solution technique miracle en matière de traitement des déchets. Avant toute décision, les collectivités doivent étudier fiabilité technique et environnementale du procédé et s'assurer de la gestion des sous produits. Aussi, le mieux environnemental dépendra des producteurs des déchets. Il s'agira de convaincre les producteurs qu'un déchet recyclable peut à terme devenir une matière première «secondaire» et non un déchet à détruire. La révolution dans le cycle des déchets ne sera pas seulement technologique. Demain, les professionnels devront apprendre au public à réduire leur production de résidus et aider les pays du sud à se doter de techniques. Nous ne pouvons pas prétendre avoir développé tous les différents types d'analyse du cycle de vie nécessaires à l'optimisation de la gestion des déchets et des cycles de vie des produits, raison pour laquelle nous invitons ceux qui sont intéressés par le domaine d'enrichir d'avantage notre travail.

Références bibliographiques

- ADEME : « optimisation de la gestion des déchets municipaux. Comment évaluer les impacts environnementaux au moyen de l'Analyse du cycle de Vie (ACV) », 2005.
- ADEME: « Stockage des déchets et santé publique », rapport de l'ADEME no X, 2004, PP100.
- ADEME: « Les ordures ménagères en France » : données de référence. Angers, 1996, 139p.
- ADSE (Association de Défense de Saint-Escobille) : « Nuisances et risques objectifs associés à l'implantation et à l'exploitation des CET dits de classe 2 », 2005
- AFNOR « Analyse de cycle de vie (Définition, déontologie et méthodologie), 1996 ,19p, Norme NF X30-300 ».
- AFNOR : « Analyse du cycle de vie,- Définition, déontologie et méthodologie », 1994, 20p
- AHLLN (Association des Habitants de Louvain La Neuve) : « Projet de centre d'enfouissement technique de déchets ultimes », 2006.
- AIOUEIMINE: « Méthodologie de caractérisation des déchets ménagers à Nouakchott (Mauritanie) : contribution à la gestion des déchets et outils d'aide à la décision », Thèse présentée à l'Université de Limoges, France, 2006, pp 200
- BAE J. H. et KIM S. K: "Treatment of Landfill Leachates: Ammonia Removal via Nitrification and Denitrification and further COD Reduction via Fenton's Treatment Followed by Activated Sludge. Water Science and Technoloev" , 1997.
- BARRINGTON: "Compost convective airflow under passive aeration. Bioresources Technologie", 2003.
- BLAKEY N. et ARCHER D.: "Bioreactor Landfil: A Microbioloecial Review". Fifth International Landfill Symposium. Sardinia. Italy, 1995
- CHARNAY F. : « Compostage des déchets urbains dans les pays en développement : élaboration d'une démarche méthodologique pour une production pérenne du compost », Thèse présentée à l'Université de Limoges, France, 2005
- CML and LEIDEN: "Impact assessment (excel spreadsheet)"
<http://www.leidenuniv.nl/cml/lca2/index.html>, 2004
- CLÉMENT B. : " Phvsico-Chernical Characteriwtion of 25 French Landfill Leachate". Fiflh International Landfill Symposium. Scardinia, Italy ,1993.
- CNIID (Centre d'Information Indépendante sur les Déchets) : « Les décharges d'ordures ménagères : un danger potentiel chez vous », 2001
- DE BERTOLDI M. , VALLINI G. et PERA A. : « The biology of composting": a review. Waste ; Management & Research, 1:157-176, 1983.
- DECQ P., HIOT B. and OBERDORFF M. : « Etude des impacts de la décharge de M'Beubeuss sur l'environnement. Plan d'assainissement et de gestion écologique du site, Pathe Balde, Dakar, 1991, p. 155 ».

ENSP (Ecole Nationale de la Santé Publique): « Eléments pour la prise en compte des effets des unités de compostage de déchets sur la santé des populations riveraines ». Rapport d'étude réalisé pour la FNADE et le Ministère français de l'Ecologie et du Développement Durable (MEDD), 2002, 81 p.

FLORENT B. : « Analyse de la composition du biogaz en vue de l'optimisation de sa production et de son exploitation, 2005 »

GCP (Groupement des Compostières Professionnelles) : « caractéristiques du compost », 2006

HEMY Y. : « Démonstration de faisabilité de la nitrification et de la dénitrification d'un lixiviat de lieu d'enfouissement sanitaire avec de la tourbe granulaire », Université de Montréal, 1999

GOOTAS H.B : « Compostage et assainissement ». Document préparé pour l'OMS, Genève, 1959, 206 p.

IEPF (Institut de l'Energie et de l'Environnement de la Francophonie) : « Guide pratique sur la gestion des déchets ménagers et des sites d'enfouissement technique dans les pays du sud », 2005

JEAN-MICHEL BALET : « Aide-mémoire, Gestion des déchets », Paris, France, 2005

JOSEPHINE P. et PHILIPPE G : « Compostage et Environnement », 2001

KITUYI: "Integrating life cycle approaches to African national development policies: considering the institutional dimension of industrial ecology". *Progress in Industrial Ecology*, 1, sous presse, 2004

LARSEN K. L. and MCCARTNEY D. M.: "Effect of C/N ratio on microbial activity and N Retention": Bench-scale study using pulp and paper biosolids. *Compost Science & Utilization*, 8, 2:147-15, 2000

MATEJKA et DE LAS HERAS F.: "Composting of municipal solid waste in Labé (Guinea): process optimisation and agronomic development", 2001

MAYSTRE et LUCIEN YVES : « Déchets urbains. Nature et caractérisation ». Lausanne, Presses polytechniques et universitaires Romandes, 119 pages, 1994

MUSTIN M. : « Le compost : gestion de la matière organique ». (Ed. François Dubusc, Paris), 1987

PATRICK R.: « Evaluation comparative de l'impact environnemental global du cycle de vie des produits. Thèse de l'Institut Nationale des Sciences Appliquées de Lyon, 276P », 1993

ONAY. T. T., POHLAND. F.G: "In situ Nitrogen in Controlled Bioreactor Landfills". *Water Research* 32. NOS : 1383-1382, 1998

PICHAT et PHILIPPE : « La gestion des déchets », 1995 ; Évreux, Dominos Flammarion 124 pages ; « Population, novembre 1977 ; Études sociologique de l'habitat, octobre 1977 »

PNUE (Programme des Nations Unies Pour l'Environnement): The African Life Cycle Assessment Network (ALCAN). LC.Net Issue 3. , 2004. Disponible sur leweb : http://www.uneptie.org/pc/sustain/lcinitiative/LC_net_Issue3/LC_net_Issue3c.htm

PNUD, Banque Mondiale : « Assainissement urbain à Ouagadougou. Diagnostic – Proposition. Projet pour l'amélioration des conditions de vie urbaine », Ministère de l'Environnement et de l'Eau du Burkina Faso, Ouagadougou, 1994, p. 95.

SOUDI B. : « Compostage des déchets ménagers et valorisation du compost Cas des petites et moyennes communes au Maroc ». (Actes éditions), 2001, 102 p.

TCHOBANOGLIOUS G. et THEISEN H.: "Integrated Solid Waste Management Engineering Principles and Management Issues", New-York, 1993

VILLEBONNET C. : « Etude quantitative des déchets d'espaces verts publics ». Mémoire ENITRIS, 119 p, 1988

WELANDER U. et HENRY SSON T.: "Nitrification of Landfill Leachate Using Suspended-Carrier Biofilm Technology". Water Research 31, No.9: 2351-2355, 1997