



Proposition de scénarios de gestion raisonnée des déchets en vue de leur valorisation énergétique

Christelle Hatik

► To cite this version:

Christelle Hatik. Proposition de scénarios de gestion raisonnée des déchets en vue de leur valorisation énergétique. Ingénierie de l'environnement. Université de la Réunion, 2015. Français. NNT : 2015LARE0034 . tel-01666256

HAL Id: tel-01666256

<https://theses.hal.science/tel-01666256>

Submitted on 18 Dec 2017

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

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



Université de La Réunion
Ecole Doctorale des Sciences, Technologies et Santé
Laboratoire de Physique et Ingénierie Mathématique pour
l'Energie et Environnement



Thèse de doctorat en Environnement et Génie Urbain

Présentée par :

Christelle HATIK

Pour l'obtention du grade de Docteur de l'université de la Réunion
62^{ème} section CNU : Génie des procédés

Proposition de scénarios de gestion raisonnée des déchets en vue de leur valorisation énergétique

Soutenue le 11 décembre 2015

Sous la Direction de. Laetitia Adelard



Directeur de thèse

Laetitia ADELARD

Maître de Conférences HDR, Université de la Réunion

Rapporteurs

Bienvenue Ranaivo RABEHAJA

Professeur, Université d'Antananarivo

Belkacem ZEGHMATI

Professeur, Université de Perpignan

Examineurs

Dominique MORAU

Maître de Conférences, Université de la Réunion

Heri-Tiana

Maître de Conférences, Université d'Antananarivo

RAKOTONDRAMARANA

Jean-Claude GATINA

Professeur, Université de la Réunion

Remerciements

La thèse, cet événement important de ma vie, fut marqué par de nombreuses réorientations de sujets qui m'ont permis de me redécouvrir jours après jours. C'est pourquoi, je tiens tout d'abord à remercier ma directrice Laetitia Adelard pour m'avoir donné cette chance de pouvoir conduire et mener à bien des travaux de recherches. Et surtout pour avoir su me suivre dans ces changements d'orientations afin que je puisse m'approprier pleinement ce sujet qui me tenait à cœur. Merci pour cette liberté et cette confiance accordée.

Je remercie également l'Université de la Réunion et le laboratoire PIMENT de m'avoir accueilli et apporté la structure nécessaire pour cette aventure enrichissante. J'ai une pensée particulière pour mes camarades de route avec qui nous avons pu nous soutenir mutuellement dans nos moments de doutes et également de joies : Aurélien, Bruno, Garry, Stéphane, Dimitri, Laurent, Placide, Boris, Frantz, Frank, Néria, Volana et un petit clin d'œil pour Olivier et Emeric. Sans oublier mes « pompom girls » sans qui cette aventure aurait été maussade Vanessa, Fiona et Christelle qui aujourd'hui comptent parmi mes amies les plus proches. Je pense également à tous les collègues du département SBE et notamment Dominique pour avoir su me conseiller et me soutenir dans mes débuts dans le monde de la recherche.

Je remercie tout particulièrement les membres du jury, mes rapporteurs, le Professeur Bienvenue Ranaivo RABEHAJA et le Professeur Belkacem ZEGHMATI pour leur conseils avisés et leur compréhension, ainsi que Monsieur Heritiana RAKOTONDRAMIANANA et Monsieur Dominique MORAU d'avoir accepté d'évaluer ces travaux de recherches.

Afin de n'oublier personnes, je remercie tous ceux que j'ai pu croiser au cours de ces années pour leurs sourires, leurs encouragements et leurs bienveillances. Une personne se détache tout particulièrement, le Professeur Jean-Claude Gatina, une personnalité généreuse, attentionnée et dévouée qui a su me tendre la main dans une période sombre de mon parcours sans qui je n'aurais pu me relever. Pour une rencontre, une force, un soutien indéfectible que je n'oublierais jamais, je vous remercie profondément.

Merci à tous mes amis notamment les girls power qui devraient se renommer les golden girls power pour votre joie de vivre, votre confiance infailible en ma personne, nos délires et surtout pour tout l'amour que vous m'avez apporté. Je vous l'ai déjà dit mais je vous aime. Je pense aussi à Stéphanie, une découverte spirituelle devenu amitié, je te remercie pour ton soutien et tes pensées positives qui m'ont fait gravir des sommets.

Je remercie mes amies de l'espace Art et Danse, elles sauront se reconnaître pour tous ces purs moments de bien être, de rigolades et faut le dire quand même de performance et de dépassement de soi ainsi que Monsieur Bazil Brown. J'espère encore pouvoir partager pleins d'autres bons moments avec vous. Je remercie mes boudas en herbe du jeudi soir qui ont su me prêter leurs oreilles et pour leurs messages d'encouragements.

Je remercie ma famille qu'elle soit de sang ou de cœur : Stéphane, Marie, Tatie, Fabrice, Claudie, Jean, Jack, Rose-Marie, Camille, la famille Catherine, Gilles pour son aide logistique, Eliette pour sa générosité et ses attentions et notamment Titine pour sa bienveillance et sa douceur. Un sincère et profond merci à mon étoile du berger pure et lumineuse, ma petite et grande Maryline qui a su me guider vers la lumière.

Sans oublier, mes piliers à qui je dédicace ces années, Maman et Julien. Maman aucuns mots ne peut qualifier ce que je ressens à ton égard. Tu as joué le rôle de secrétaire, de correctrice, de point de ravitaillement, de mentor, de coach et j'en passe mais surtout pour ce rôle fabuleux que tu remplis à merveille tous les jours celui de Maman. Je te suis éternellement reconnaissante pour ta dévotion et ton amour infini. Pour tout cela, « *chaque cellule de mon corps* » te remercie. Et Julien, mon compagnon de vie depuis maintenant une éternité, je te remercie d'être ce que tu es, tu as su me faire confiance, m'aimer dans les pires comme dans les bons moments et surtout tu as su me faire grandir un peu plus chaque jour. C'est au travers des valeurs que tu incarnes que j'ai pu puiser au fond de moi la force nécessaire. Maman, Julien, le mot merci n'est pas assez fort pour exprimer ma gratitude mais sachez sincèrement que je vous aime. Et une attention toute particulière pour mes boules de soleil et d'énergie Bazoo et Toundra.

Une page se tourne mais restera gravée à jamais.

MERCI à tous,

*À ma mère,
À Julien,*

« L'Homme est l'espèce la plus insensée, il vénère un dieu invisible et massacre une nature visible. Sans savoir que cette nature qu'il massacre est ce dieu invisible qu'il vénère. »

Hubert Reeves

Sommaire

Sommaire.....	9
Introduction Générale	16
Chapitre 0 : Introduction aux déchets et à la gestion des déchets.....	25
I. Introduction	29
II. Les déchets et leur gestion.....	30
II.1 Les déchets	30
II.2 La gestion des déchets.....	48
III. Les modes de gestion des déchets	55
III.1 Généralités	55
III.2 Les modes de collecte	59
III.3 Les modes de tri	61
III.4 Les modes de traitement.....	64
III.5 Organisation et structuration de la gestion des déchets.....	79
IV. Le contexte réunionnais.....	86
IV.1. La gestion des déchets à la Réunion	86
IV.2 Le contexte énergétique réunionnais.....	97
V. Conclusion	98
Partie 1 : Approches méthodologiques d'analyse et de simulation	100
..100	
Chapitre 1 : Outils d'analyses mathématiques	101
Sommaire.....	101
I. Introduction	103
II. L'Analyse en composante principale (ACP).....	104
II.1 Démarche méthodologique de réalisation d'une ACP	106
II.2 Exemple d'application.....	112
II.3 Projection	118
III. L'analyse multicritères.....	121
III.1 Démarche méthodologique générale d'une AMC	123
III.2 Projection autour de l'évaluation des gisements de déchets et des scénarios de gestion de déchets	128

IV. Conclusion	130
Chapitre 2 : Bases méthodologiques des outils de modélisation et de simulations	131
I. Introduction à la simulation	134
II. L'approche systémique	136
II.1 Introduction à la systémique	136
II.2 Les préceptes et les concepts de l'approche systémique	138
II.3 Qu'est-ce qu'un système complexe ?.....	143
II.4 La démarche méthodologique de l'approche systémique	145
II.5 Projection : Appropriation et description générale de l'approche systémique développée	148
II.6 Définition des termes utilisés pour la démarche méthodologique.....	148
III. Référence au cadre normatif	149
III.1 Introduction	149
III.2 Le contexte normatif.....	152
III.3 Cadre normatif développée autour de l'ACV.....	154
III.4 Cas particulier : Présentation du cadre normatif appliqué à la gestion des déchets	160
III.5 Projection développée autour de l'ACV appliquée à la gestion des déchets	163
IV. L'approche typologique	164
IV.1 Introduction à l'approche typologique.....	164
IV.2 Présentation des typologies.....	165
V. Conclusion	166
 Chapitre 3 : Conception et réalisation d'un outil de simulation de gestion et de traitement des déchets.....	 168
Sommaire.....	171
I. Introduction	172
II. Conception d'un outil de description et de simulation d'un dispositif de gestion et de traitement des déchets.....	173
II.1 Définition des termes utilisés pour la démarche méthodologique.....	173
II.2 Description générale de l'outil de simulation	176
II.3 Le choix du modèle : Description des sous-niveaux	176
II.4 Identification des flux et de leurs paramètres de description.	180
II.5 Description du système global d'observation	184

II.6	Description des Unités fonctionnelles, des Opérations Unitaires et des composants	188
II.7	L'Unité Fonctionnelle de gestion des extrants	214
III.	Réalisation de l'Outil de simulation.....	217
III.1	Explicitation d'un scénario de gestion et de traitement autour des typologies de déchets et des modes de traitement	220
III.2	Identification et Explicitation du système global d'observation ou filière de gestion et de traitement	222
III.3	Identification et Explicitation des Unités Fonctionnelles SS1i.....	224
III.4	Identification et Explicitation des Opérations Unitaires	228
III.5	Identification et caractérisation des composants	230
III.6	Explicitation des pages d'acquisition de données.....	230
III.7	Exemple de navigation et d'acquisition de données au travers de l'UF d'incinération.....	238
IV.	Conclusion	243
Partie 2 :		246
Chapitre 4 : L'étude du gisement des biodéchets.....		247
Sommaire		248
I. Introduction		250
II. Quantification du gisement de biodéchets.....		252
II.1	Création de la base de données des biodéchets.....	253
II.2	Potentiels de production en déchets organiques à la Réunion.....	268
III. Analyses statistiques et interprétations de la base de données .		277
III.1	Analyse univariée	280
III.2	Analyses bivariées	284
III.3	Régression linéaire Multiple.....	290
III.4	ANOVA	294
III.5	Analyse en Composantes Principales (ACP).....	295
IV. Conclusion		303
Chapitre 5: Analyse des sites potentiels et proposition de scénarios de gestion des déchets.....		304
Sommaire.....		307
I. Introduction du chapitre.....		310

II. Recherche de sites potentiels d'implantation d'unité de traitement : Mise en œuvre d'une AMC.....	311
II.1 La sélection de sites potentiels d'implantation	312
II.2 Calibrage des paramètres : Acquisition de données	313
II.2.1 Présentation des critères	313
II.2.2 Présentation du tableau des performances.....	316
II.2.2.1 Les critères environnementaux	316
II.2.2.2 Les critères économiques : C9 et C10.....	317
II.2.3 Pondération des critères pour l'évaluation des sites potentiels	317
II.3 Proposition de sites potentiels d'implantation.....	318
III. Sélection et évaluation des scénarios retenus.....	328
III.1 Sélection des scénarios de gestion des déchets	328
III.1.1 Les hypothèses de base	330
III.1.1.1 La FFOM.....	330
III.1.1.2 Les déchets verts	330
III.1.1.3 Les boues de STEP.....	331
III.1.1.4 Les effluents agricoles.....	331
III.1.1.5 Les biodéchets d'IAA	332
III.1.1.6 Les biodéchets organiques des GMS et des commerces alimentaires	332
III.1.1.7 Les biodéchets de la restauration collective et des marchés forains	332
III.1.1.8 Projection autour des hypothèses de base.....	332
III.1.2 Construction des scénarios	334
III.1.2.1 Les options de collecte	336
III.1.2.2 Les options de prétraitement et de tri.....	336
III.1.2.3 Les options de traitement des déchets primaires et des produits induits	338
III.1.3 Présentation des scénarios	342
III.1.4 Les scénarios retenus pour l'AMC	344
III.1.4.1 Les scénarii de valorisation en électricité	344
III.1.4.2 Les scénarii de valorisation en carburant.....	347
III.2 Calibrage des paramètres : Acquisition des données.....	351
III.2.1 Présentation des critères	351
III.2.2 Présentation du tableau des performances.....	353

III.2.2.1	Les critères environnementaux : C1 et C2 : Les émissions de GES	353
III.2.2.2	C3, C4 et C5 : Les nuisances	354
III.2.2.3	Les critères économiques : C6, C7, C8 et C9 :	357
III.2.2.4	Les critères sociaux : C10, C11 et C12.....	358
III.2.2.5	Les critères technologiques de C12 à C15	359
III.2.3	Pondération des critères pour l'évaluation des scénarios.....	361
III.2.4	Proposition de scénarios de gestion au travers du logiciel Visual PROMETHEE.....	362
III.2.4.1	Interprétation des classements au regard des scénarios	365
III.2.4.2	Discussion des classements obtenus	367
IV.	Conclusion	369
	Conclusion générale	372
	Bibliographie	377
	Liste des figures	394
	Liste des tableaux.....	399

Acronymes

HAU : Huiles Alimentaires Usagées

HCE : Hong Chong Environnement

IAA: Industrie Agroindustrielle

ICPE : Installation Classées Pour l'Environnement

ISD : Installation de stockage des déchets (regroupe l'ensemble des types d'installations de stockage ISDND, ISDD et ISDI)

ISDD : Installation de Stockage des Déchets Dangereux

ISDI : Installation de Stockage des Déchets Inertes

ISDND : Installation des Déchets Non Dangereux

ISO: International Organization for Standardization

MIOM : Mâchefers d'Incinération des Ordures Ménagères

MO : Matière Organique

MODECOM : MéthOde DE Caractérisation des Ordures Ménagères

MS : Matière Sèche

OMR : Ordures Ménagères Résiduelles

OP : Opération Unitaire

PAP : Porte à Porte

PCI : Pouvoir Calorifique Inférieur

PER : Pôle d'Excellence Rurale

PG : Phase de Gestion

PLP : Plan Locaux de Prévention

PPDGDND : Plan de Prévention Départemental des Déchets Non Dangereux

PRERURE: Plan Régional des Energies Renouvelables et de l'Utilisation Rationnelle de l'Energie

PROMETHEE : Preference Ranking Organisation METHod for Enrichment Evaluations

PRPGDD : Plan Régional de Prévention de Gestion des Déchets Dangereux

PTB : Pré-Traitement Biologique

REFIOM : Refus

REP : Responsabilité Elargie du Producteur

SGO : Système Global d'Observation

SRCAE: Schéma Régional Climat Air et Energie

SS: Sous-Système

STARTER : Stratégie pour l'Autonomie énergétique, la Relance et la Transition de l'Economie Réunionnaise

STEP : Station d'Épuration

t : tonnes

TCO: Territoire de la Côte Ouest

TCP : Traitement Physico-Chimique

TE : Traitement Enzymatique

TM : Tri Mécanique

TMB : Traitement Mécano-Biologique

UF : Unité Fonctionnelle

UIOM : Unité d'Incinération des Ordures Ménagères

Introduction Générale

« Il faut d'abord changer les esprits des femmes et des hommes pour oser aller vers le changement et devenir conscient du formidable moment d'opportunité et d'optimisme dans lequel nous nous trouvons. Au-delà du bon sens, la période de crise actuelle peut être le moment pour oser changer et faire évoluer nos modes de production comme de consommation »

Nicolas Buttin.

La société de consommation dans laquelle, nous évoluons est génératrice de beaucoup de pollutions et notamment de déchets. Cette croissance exponentielle de détrit, nous amène à reconsidérer nos habitudes de consommation et notre vision du système actuel. C'est dans une réelle prise de conscience des dégâts occasionnés que nous pourrions agir pour améliorer ces failles dans un but d'optimisation et de performances. C'est pourquoi, nous avons choisi d'étudier la gestion des déchets afin de pouvoir répondre à ces objectifs est proposer des scénarios de gestion et de traitement des déchets adaptés aux territoires étudiés. Pour mener à bien cette étude, nous nous sommes intéressés à l'île de la Réunion permettant ainsi à contribuer au développement des territoires insulaires où la gestion des déchets s'en trouve encore plus problématique (Figure 1).

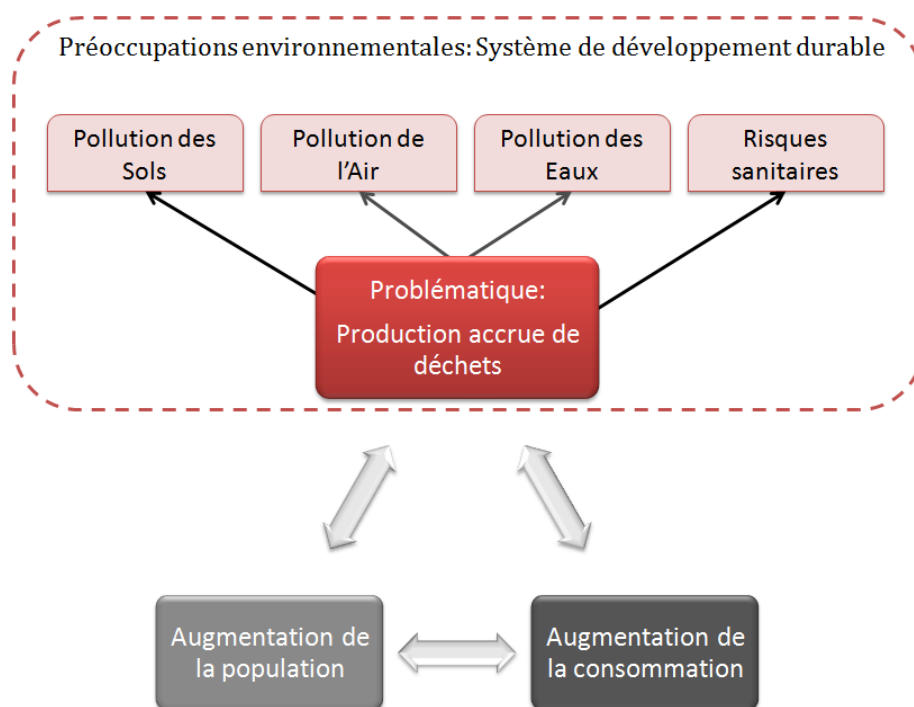


Figure 1 : Synthèse de la problématique générale

La Réunion est une petite île de l'océan indien d'environ 2500km². Elle est à la fois un département et une région d'outre-mer de France lui conférant une place particulière au sein de l'Union Européenne. La configuration de l'île en cône contraint la population à se répartir majoritairement sur les côtes au dépend des hauteurs. L'île compte 24 communes qui sont répartis selon 5 communautés d'agglomération qui sont en charge de la gestion des déchets. En 2012, la population de la Réunion atteignait les 833 000 habitants soit une densité de 334 hab/km² (INSEE, 2012). En quarante ans, la population réunionnaise a doublée. Face à cet accroissement, la Réunion jusque-là autonome en production électrique grâce à l'hydroélectricité se vit devenir dépendante des énergies fossiles pour répondre à ces besoins.

Aujourd'hui, l'importation de charbon et de fioul constitue une part importante des énergies fossiles utilisées sur l'île. La production électrique en 2014 s'élevait à environ 2857 GWh (245,5 ktep) dont 1915,3 GWh (67%) produits à partir d'énergies fossiles. La consommation énergétique la même année avoisinait les 2467 GWh

(Angelis-Dimakis, Biberacher et al. 2011). Les deux principaux postes de consommation sont actuellement l'alimentation en carburants des transports et la création d'électricité.

De ce fait, la Réunion, dans son contexte insulaire, est de façon plus particulière confrontée au problème de la gestion des déchets et à la problématique de l'autonomie énergétique. C'est pourquoi, elle s'intègre tout particulièrement dans le PRERURE et la STARTER. La **ST**ratégie pour l'**A**utonomie énergétique, la **R**elance et la **T**ransition de l'**E**conomie **R**éunionnaise (STARTER) entre dans un plan d'action : le **P**lan **R**égional des **E**nergies **R**enouvelables et de l'**U**tilisation **R**ationnelle de l'**E**nergie (PRERURE).

En effet, il relève des compétences de la Région Réunion de gérer la Maîtrise de la Demande d'Energie et des ENergies Renouvelables selon la **L**oi d'**O**rientation pour l'**O**utre-**M**er (LOOM) du 13 décembre 2000. Le PRERURE a donc pour but de réduire les émissions de gaz à effet de serre et d'atteindre l'autonomie énergétique par le biais du développement d'énergies renouvelables sur tout le territoire réunionnais mais aussi en contrôlant au mieux la demande en énergie.

La STARTER préconise de créer un « mix énergétique » 100% énergies renouvelables dans le but d'atteindre l'autonomie énergétique d'ici 2025 à 2030. Ce mix comprend les énergies issues en autres de la biomasse, de l'hydro-électricité, de l'éolien et du photovoltaïque. A la Réunion, différents types d'énergies sont disponibles : les énergies intermittente, de semi base et de base.

Parmi, ces énergies, nous considérons principalement l'énergie de base. Elle se compose de l'hydro-électricité, de l'énergie thermique de la mer, de la géothermie et de la biomasse (bois énergie, bagasse, déchets verts, canne fibre...). Ces énergies fonctionnent près de 9000 heures par an. Elles sont disponibles constamment et ne nécessitent pas de stockage. Ces dernières attentionnent particulièrement les chercheurs.

Cependant, à l'heure actuelle, la géothermie a été mise en parenthèse car soulevant trop de polémiques. Concernant l'hydro-électricité et l'énergie thermique de la mer, les recherches et expérimentations avancent à grand pas. Reste maintenant à mettre en place et à développer les techniques et recherches sur l'énergie de la biomasse à la Réunion.

Ce constat, nous a également réconforté dans nos choix de recherches à savoir contribuer à améliorer les connaissances et points de vue autours de la question de l'autonomie énergétique et de la production de déchets. Parmi ces déchets, nous nous sommes principalement intéressés aux biodéchets qui s'intègrent pleinement dans ce l'on appelle la biomasse liée à une énergie de base.

La biomasse se définit comme «un ensemble de matières organiques pouvant devenir des sources d'énergie ». Ces matières organiques proviennent entre autre des plantes (canne à sucre, bois énergie...) qui constituent une forme de stockage de l'énergie solaire, captée et utilisée grâce à la chlorophylle. Mais, la biomasse peut aussi provenir des effluents agricoles et industriels, des boues de stations d'épuration et des déchets organiques.

Cette énergie peut être utilisée soit directement (bois énergie), soit après transformations biologiques ou thermiques de la matière organique (biogaz, composte), ou soit après de nouvelles transformations chimiques (biocarburant). Ces énergies sont considérées comme des énergies dites propres à condition que le dioxyde de carbone (CO_2) libéré lors de leur traitement ne soit pas supérieur à la quantité absorbée par la plante ou autres lors de sa croissance. Dans ce cas, le bilan CO_2 est dit nul voir négatif si la quantité libérée est inférieure ou égale à celle absorbée par la plante. Cette source présente donc un réel intérêt à la fois énergétique et humain (salubrité et santé) au travers des bienfaits d'une bonne gestion.

Le développement d'une telle stratégie permettrait de répondre aux besoins énergétiques de l'île qui ne cessent de croître chaque année de 4 à 5 % [1]. Il semble nécessaire de mettre en place des solutions durables face à cette demande permanente en énergie tout en respectant l'environnement. Ces énergies présentent une alternative aux énergies fossiles (charbon et fioul) qui deviennent rares, chères et surtout qui sont une source importante de pollution. Une réponse à ces nombreuses problématiques serait la filière de valorisation des biodéchets.

A titre d'exemple, la valorisation de la fraction fermentescible des ordures ménagères (FFOM) pourrait permettre de produire au moins 7 MW de puissance à La Réunion, avec des unités fonctionnant pendant 5 heures par jour (couverture des pics de consommations de 9h à 11h30 et de 18h à 20h30) (Etude PFRD 2005). Le potentiel est important mais la filière de gestion est à structurer.

De plus, depuis de nombreuses années, la gestion et la valorisation des déchets organiques municipaux sont devenues incontournables. La politique nationale des déchets de 2009 – 2014 a pour ambition d'atteindre les objectifs du Grenelle en matière de valorisation des déchets et de réduction des flux stockés et incinérés. Elle suppose de doubler, d'ici 2015, les capacités de valorisation biologique de la fraction organique des déchets ménagers et assimilés.

Le captage et la valorisation des gisements de gros producteurs de déchets organiques constituent également un enjeu majeur. Il s'agit de réunir les conditions pour développer, en toute proportionnalité et complémentarité :

- la collecte sélective de la part fermentescible des déchets,
- le compostage domestique et le compostage industriel,
- la méthanisation et tous autres procédés permettant une valorisation des biodéchets.

L'objectif constant est de permettre l'optimisation de la production énergétique et quand cela est possible le retour au sol d'une matière organique de qualité, compatible avec les objectifs de préservation des milieux.

Par ailleurs, le Laboratoire de Physique des Bâtiments et des Systèmes, équipe Génie de l'Environnement et des Espaces Bâti a construit sa problématique générale de recherche autour du suivi des flux de la valorisation énergétique des déchets organiques dans les divers systèmes. Les logiciels et les modèles physico-chimiques développés notamment pour la digestion anaérobie (méthanisation) ont

été élaborés afin de décrire au mieux les flux et typologies de déchets, et également de définir au mieux des choix de méthodes durables de gestion des déchets. L'objectif in fine est d'intégrer à notre réflexion diverses entités autres que l'habitat individuel: industries, installations agricoles ou d'élevage, quartier ou agglomération, et d'élargir notre réflexion par la prise en compte de la dimension spatiale notamment par une approche territoriale.

L'objectif de cette thèse est de proposer un mode de gestion global des biodéchets sur le territoire réunionnais avec pour principal intérêt leurs valorisations sous forme énergétique.

Ces recherches sont basées sur quatre axes principaux :

- Axe 1 : Proposition d'un schéma de collecte et de traitement des biodéchets avec intégration d'une approche systémique vis-à-vis des traitements des déchets; analyse des couplages possibles avec différents modes de collecte par le biais de la réalisation d'un outil de simulation,
- Axe 2 : Création et Evaluation d'une base de données quantitative des gisements de biodéchets à La Réunion (volumes et distribution spatiale) analysée par analyse en composantes principales,
- Axe 3 : Proposition d'implantations d'unité de traitement des déchets à une échelle communale ou territoriale par analyse SIG,
- Axe 4 : Proposition de scénarios de gestion en application aux axes précédents.

Afin de structurer ces axes, le manuscrit se découpe en deux parties et suivant 6 chapitres (Figure 2).

La partie 1 présente les méthodes d'analyses et de simulation appréhendées pour développer l'outil de simulation et analyser la base de données. Pour cela, nous avons souhaité tout d'abord présenter les méthodes d'analyses statistiques (Partie- Chapitre 1). L'utilisation de ces approches, nous permettent d'interpréter les résultats de l'axe 2 et de l'axe 3. Par l'exposition de ces méthodes, nous tenterons de justifier nos objectifs de recherches. Une fois, les outils d'analyses déterminés et définis dans le cadre de l'étude, nous devons prendre connaissances des modèles de simulation existants et à disposition afin de nous positionner dans un cadre normatif (Partie 1- Chapitre 2). Ce cadre a pour objectif de situer notre outil de simulation dans un environnement défini et compréhensible pour tous afin d'en faciliter l'utilisation (axe 1). Enfin, la démarche de conception de l'outil sera développée suivi d'une étape de réalisation (Partie 1- Chapitre 3).

La partie 2 consiste à développer toutes les applications liées à l'étude des biodéchets sur le territoire réunionnais. Pour cela, la construction et les résultats de la base de données sont présentés et interprétés par appropriation des méthodes d'analyses définies au chapitre 1 (Partie 2- Chapitre 4) dans le chapitre 4. Et afin

d'affiner, l'approche scientifique, nous considérons l'élaboration de scénarios de gestion ainsi que leur classement via la mise en place de critères de sélection (Partie 2- Chapitre 5). Les scénarios retenus seront donc pleinement adaptés au contexte local (axe 4). En parallèle aux scénarios de gestion, une analyse des sites potentiels d'implantation d'unité de traitement est effectuée afin de proposer des filières réalistes face à la problématique d'insularité.

La Figure 3 résume la démarche scientifique développée au travers de l'outil de simulation.

Mais préalablement au développement des parties 1 et 2, un chapitre introductif sur les déchets et leur gestion est nécessaire afin préciser les enjeux et les contextes de l'étude.

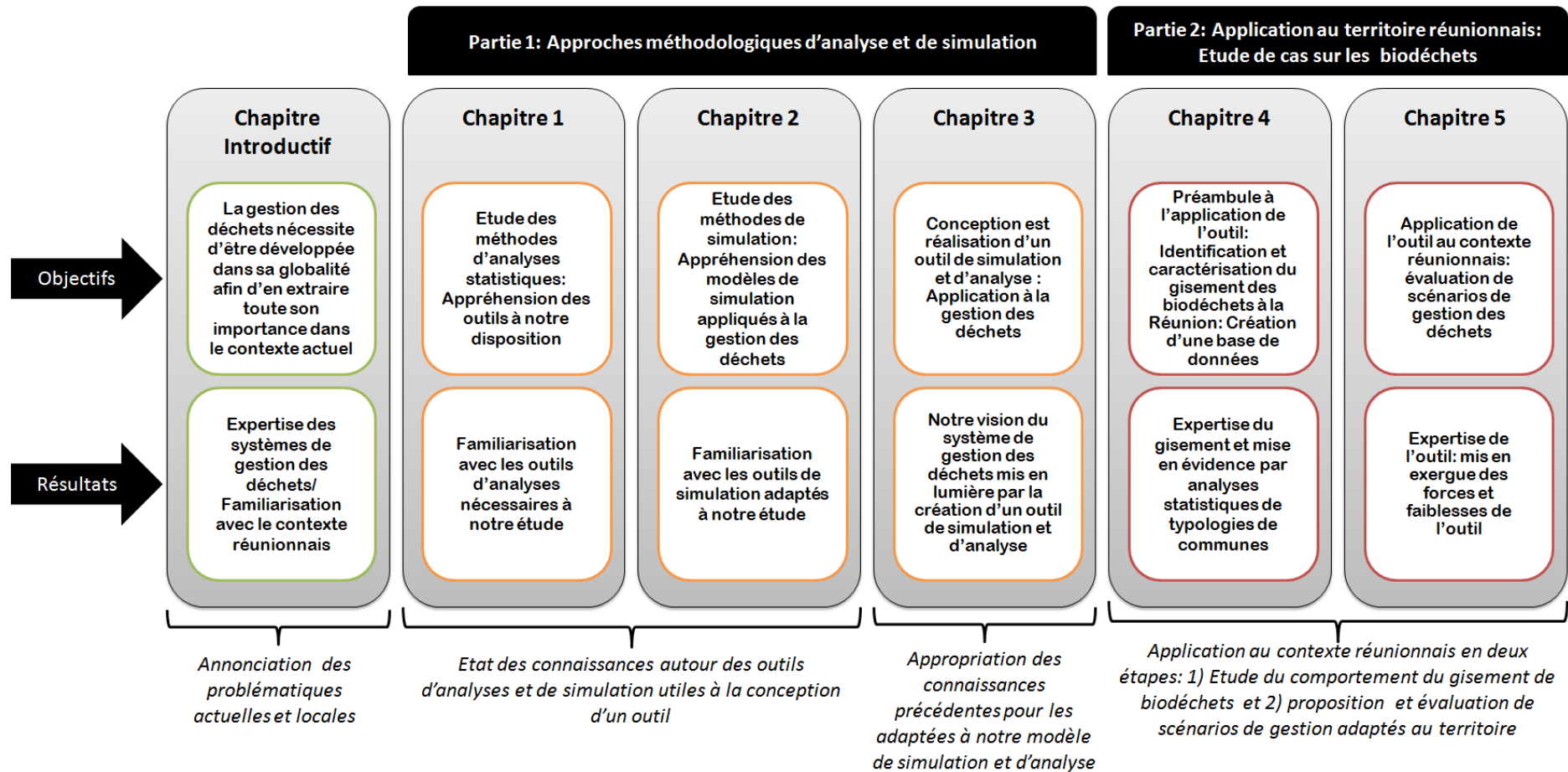


Figure 2 : Synthèse de la structuration et du contenu du manuscrit

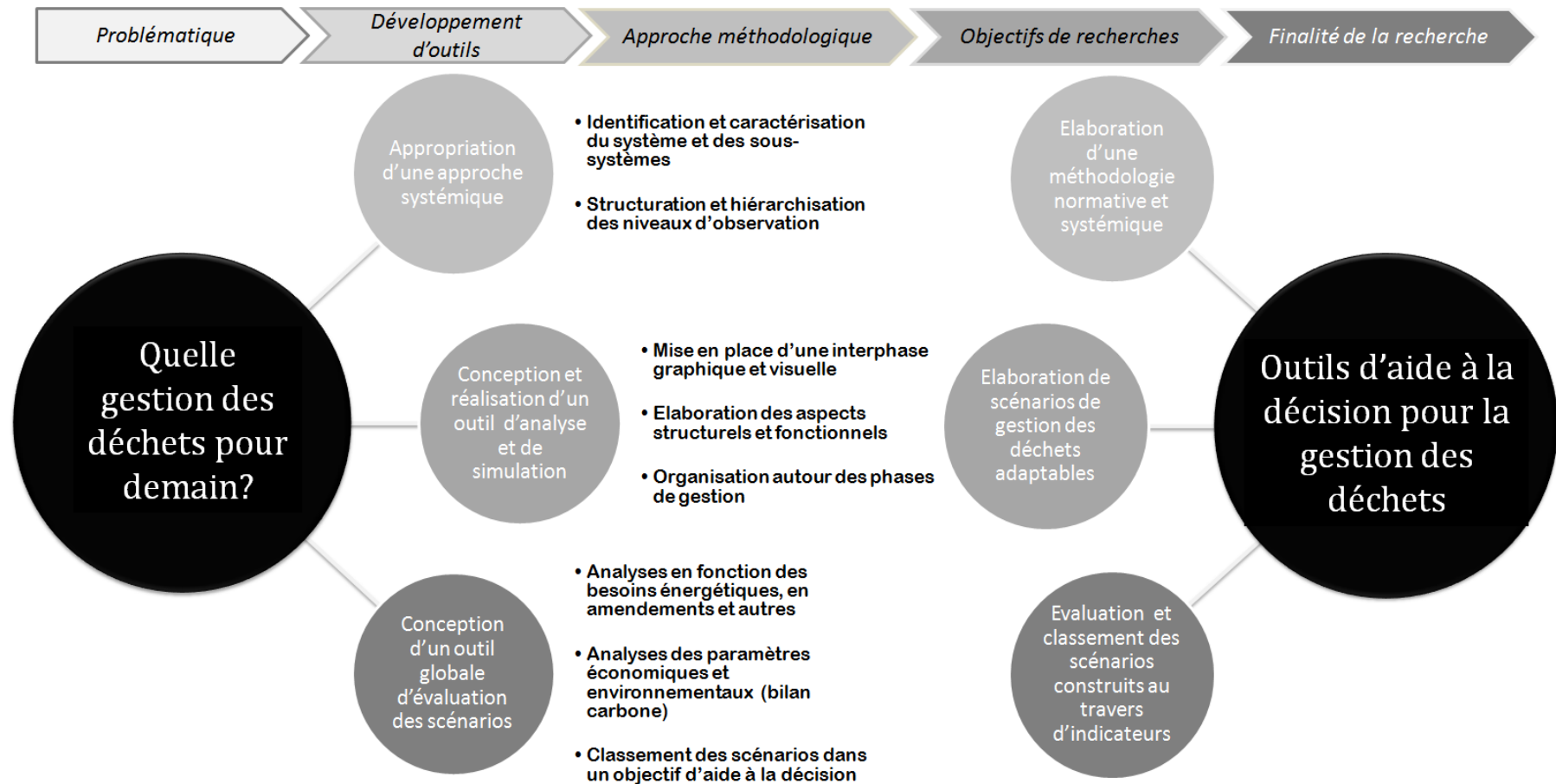
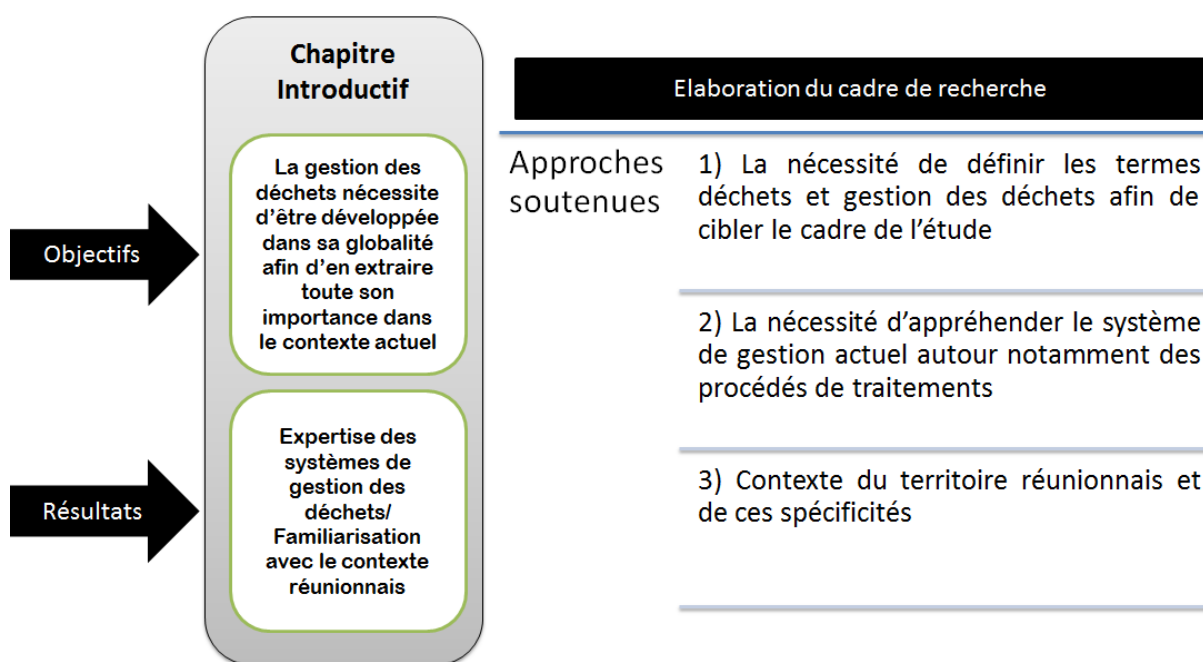


Figure 3 : Synthèse de la démarche scientifique

Chapitre 0

Introduction aux déchets et à la gestion des déchets



Sommaire

I. Introduction	29
II. Les déchets et leur gestion.....	30
II.1 Les déchets	30
II.1.1 L'histoire des déchets du moyen âge à nos jours en France.....	30
II.1.2 Qu'est-ce qu'un déchet ?.....	31
II.1.3 Les typologies de déchets	33
II.1.3.1 Typologies selon leurs origines.....	33
II.1.3.2 Typologies selon la nature physico-chimique	35
II.1.3.3 Nomenclature européenne	37
II.1.4 Le cadre juridique des déchets	39
II.1.4.1 Le droit de l'environnement.....	39
II.1.4.2 Le cadre juridique relatif aux déchets	40
II.1.4.3 Les actions et les plans qui découlent du cadre juridique	41
II.1.5 L'actualité des déchets en chiffre.....	45
II.1.5.1 La production des déchets à l'international.....	45
II.1.5.2 La production des déchets en Europe et en France	45
II.1.5.3 La production des déchets à la Réunion.....	46
II.2 La gestion des déchets.....	48
II.2.1 Qu'est-ce que la gestion des déchets ?.....	48
II.2.2 Organisation des services.....	49
II.2.2.1 Les services déconcentrés de l'Etat	50
II.2.2.2 Les intercommunalités territoriales et structures d'intercommunalités	50
II.2.2.3 Autres acteurs	50
II.2.3 Courant actuel	51
II.2.3.1 Economie circulaire	51
II.2.3.2 Industrie écologique.....	52
III. Les modes de gestion des déchets	55
III.1 Généralités	55
III.2 Les modes de collecte	59
III.3 Les modes de tri	61
III.3.1 Le mode de tri mécanique	61
III.3.2 Les modes de prétraitement	62
III.3.2.1 Le prétraitement par procédé d'hygiénisation.....	62

III.3.2.2	Le prétraitement par voie enzymatique	63
III.4	Les modes de traitement.....	64
III.4.1	Les procédés thermiques.....	65
III.4.1.1	La pyrolyse	65
III.4.1.2	La gazéification	66
III.4.1.3	Le procédé d'incinération	68
III.4.2	Les procédés biologiques et biochimiques.....	71
III.4.2.1	Le procédé de méthanisation	71
III.4.2.2	Le procédé de compostage.....	73
III.4.2.3	Le procédé d'enfouissement	74
III.4.3	Le procédé physico-chimique	77
III.5	Organisation et structuration de la gestion des déchets.....	79
III.5.1	L'étape de collecte	79
III.5.2	L'étape de tri ou de prétraitement	81
III.5.3	L'étape de traitement.....	82
IV.	Le contexte réunionnais	86
IV.1.	La gestion des déchets à la Réunion	86
IV.1.1	Les équipements existants	86
IV.1.2	Présentation des infrastructures réunionnaises actuelles et des projets à venir	90
IV.1.2.1	La station d'épuration du Grand Prado	90
IV.1.2.2	Projet existant l'unité de méthanisation des vinasses de la Rivière du Mat	91
IV.1.2.3	Projets à venir.....	93
IV.2	Le contexte énergétique réunionnais.....	97
V.	Conclusion	98

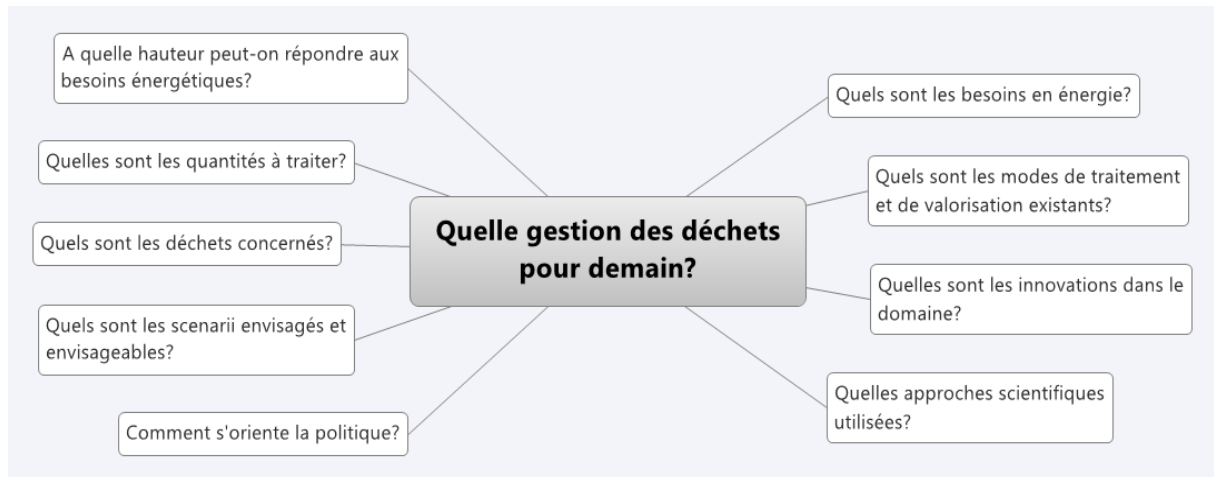


Figure 4: Les questionnements de recherche qui constituent le cœur du chapitre : Quelles sont les approches scientifiques pour répondre à la problématique de gestion des déchets

I. Introduction

Plusieurs logiques interviennent autour de la notion de déchets, entité complexe de par la variété de ses caractéristiques, de ses sources de production, des environnements avec lesquels ils interagissent et des contextes économiques, juridiques et technologiques. Ces différentes bases de réflexions induisent des définitions variables selon les approches considérées. Elles interviennent également sur les modes de gestion et de traitement qui sont très divers. Il apparaît donc important de bien se situer dans ce vaste champ de recherche.

Ce chapitre a pour objectif de cerner l'état de l'art concernant la gestion et les procédés de traitement des déchets. Il s'agira de situer les différents enjeux rencontrés et les courants de pensées qui les ont fait émerger au cours du temps. Nous conduirons nos réflexions dans un environnement local, à La Réunion, et national, en France métropolitaine. Nous nous inspirerons également des actions menées dans d'autres pays dans le monde, notamment européens, afin de mieux analyser et comprendre les savoirs et savoir-faire développés dans des contextes les plus divers autour des questions que nous aborderons dans ce travail de recherche.

Nous présenterons d'abord des généralités autour de la notion de déchets afin de cibler différentes approches et définitions qui sont retenues en fonction des contextes d'analyse, notamment politiques, juridiques, technologiques. Puis nous aborderons les différents modèles d'organisation de la gestion des déchets qui ont sensiblement varié selon les approches considérées au fil du temps mais aussi des lieux d'opération. Nous nous intéresserons aussi aux modes de traitement des déchets en relation avec les évolutions technologiques au cours du temps et selon les pays afin de cerner les procédés à notre disposition pour proposer des analyses et des solutions que nous proposerons au cours de nos recherches. Enfin, nous repositionnerons cette prospection dans l'environnement réunionnais, territoire qui constitue notre champ d'investigation.

La Figure 4 résume la démarche adoptée tout au long de ce chapitre.

II. Les déchets et leur gestion

II.1 Les déchets

Les déchets sont au cœur de cette étude. Pour ce faire il est important d'en connaître le sens qu'il soit populaire ou juridique. Il existe à première vue une multitude de déchets, c'est pourquoi s'en approprier les classes est essentiel afin notamment de cibler celles qui nous intéressent tout particulièrement. Ces généralités sont aussi l'occasion d'observer le contexte juridique dans lequel évolue la gestion des déchets de nos jours, à savoir que ce contexte s'est dessiné au fil des années et de leur histoire. Une fois, ces points précisés, nous pouvons illustrer ces propos au travers de chiffres sur les déchets, de l'international jusqu'au local en passant par la gestion des déchets en France métropolitaine.

Il semble important de préciser un certain nombre de points sur l'objet d'étude avant d'entrer dans le vif du sujet. Ces généralités sont orientées de manière à percevoir le chemin accompli en termes d'évolution au travers d'une synthèse historique, en termes de vision au travers de différents points de vue et enfin de classification. Ces axes permettent de poser le cadre dans lequel l'étude évolue tout au long de ce manuscrit.

II.1.1 L'histoire des déchets du moyen âge à nos jours en France

Au moyen âge, la croissance urbaine se fit rapidement sentir ainsi que la production d'ordures qui étaient simplement jetées dans les rues et les rivières. Les odeurs nauséabondes de ces ordures ont rapidement insupporté les habitants et principalement Philippe Auguste¹ qui en 1184 ordonna le pavage des rues de Paris. En plus de paver les rues, il ordonna l'aménagement de canaux et fossés centraux pour faciliter l'évacuation des déchets. Ce fut la première réelle réussite de mise place de solution de gestion des déchets.

Au cours de l'histoire plusieurs autres tentatives ont été menées et légiférées grâce aux actions combinées de Saint-Louis², de Louis XII³ et de Philippe Auguste qui tentent d'organiser un service d'enlèvement des ordures, mais en vain car financé par un impôt spécial. Ce n'est qu'en 1531, que de réelles mesures sont appliquées comme l'obligation d'installer des fosses septiques dans chaque maison. Plus tard, en 1870, le Baron Haussmann⁴ remplace le « tout à la rue » par le « tout à l'égout »

¹ Philippe II Auguste (1165-1223) septième roi de la dynastie dite des capétiens, fils de Louis VII

² Saint-Louis plus connu sous le nom de Louis IX de France (1214-1280), neuvième roi de la dynastie dite des capétiens, fils de Louis VII

³ Louis XII (1462-1515) de France devient roi de France en 1498, alors qu'il était Duc d'Orléans. C'est en 1506 qui décida que la royauté serait en charge du ramassage et de l'évacuation des ordures.

⁴ Georges Eugène Haussmann (1809-1891) devient Préfet de Paris 1853 à 1870 période durant laquelle il engage des travaux d'aménagement et d'assainissement urbains.

pour les déchets liquides. Et parce qu'une idée entraîne une autre, le Préfet de la ville de Paris, Eugène Poubelle⁵ obligea le 24 juillet 1883, les propriétaires à mettre à la disposition de leurs locataires des récipients munis d'un couvercle afin qu'ils puissent y déposer leurs déchets, c'est à ce moment que naît la poubelle. Quatre mois plus tard, le 24 novembre 1883, Eugène Poubelle fit évoluer cette obligation d'avoir une poubelle par l'obligation d'avoir quatre poubelles : une pour les matières putrescibles, une pour le verre, les faïences et une pour les chiffons et le papier. Cette pratique fut malheureusement de courte durée.

Ce n'est que quelques siècles plus tard, lors de l'industrialisation, qu'apparurent deux nouveaux métiers : les vidangeurs et les chiffonniers. Il s'agit des précurseurs et des pionniers en termes de tri. Le vidangeur qui récupère l'urine et les excréments dans les fosses d'aisance et les revendent comme engrais aux paysans, ainsi que les boues de rues qui permettent l'essor du maraîchage. Et le chiffonnier qui, par le recyclage des déchets, participe à l'essor de l'industrialisation. La disparition de ces métiers au cours du XX^{ème} siècle donna naissance à un nouveau système de traitement des déchets : les centres de stockage. Ces initiatives de tri et de recyclage (ne concernant pas le reste de la population) ont poussé les villes à utiliser les services d'éboueurs équipés de bennes, dans un premier temps à cheval et rapidement en véhicules motorisés.

Parallèlement, les recherches menées par Pasteur⁶ au cours des années 1850 jusqu'à sa mort ont permis de faire avancer les décisions dans la gestion des déchets. En effet, les hygiénistes conclurent qu'il était préférable de brûler les ordures plutôt que de les enfouir. C'est à cette époque que fut mise en place la construction des premiers incinérateurs en région parisienne. (C.de Silguy, 1996)

Ce bref aperçu des débuts de la gestion des déchets montrent bien l'intérêt et l'enjeu communs que nous avons à participer activement à la gestion des déchets. C'est suite à de nouvelles découvertes scientifiques et à la gêne occasionnée par la prolifération des déchets qu'une prise de conscience s'est développée aux vues des enjeux (odeurs, encombrement, hygiène...). Ce qui en ressort métaphoriquement à mon sens, est qu'il serait vu comme un acte négligeant de fermer les yeux alors qu'une maladie contagieuse émerge. C'est pourquoi, les paragraphes suivants s'attachent à définir ce « mal ».

II.1.2 **Qu'est-ce qu'un déchet ?**

A l'origine, le mot déchet dérive du verbe déchoir. Un déchet signifierait par conséquent un bien déchu ; un bien dont on veut « se défaire » au sens de la notion communautaire (européenne). En effet, le terme déchet peut être apprécié différemment selon le contexte mais également selon le niveau législatif. Ce terme pose encore aujourd'hui des problèmes d'interprétations. Le but étant que le « droit des déchets » soit commun à tous les Etats membres de l'Union Européenne de ce

⁵ Eugène Poubelle (1831-1907), Préfet de la Seine en 1883, il ordonna alors aux propriétaires d'équiper leurs logements de récipients pour accueillir les déchets dans le but d'améliorer l'hygiène de la ville de Paris.

⁶ Louis Pasteur (1822-1895), scientifique français, précurseur de la microbiologie inventa le vaccin contre la rage

fait, il faut que la définition proposée soit rédigée avec un vocabulaire qui ne prêterait pas à confusion et à différentes interprétations des Etats membres. Pour se faire, nous allons voir qu'un texte en remplace un autre afin d'améliorer au fil des écritures cette définition et bien d'autres.

La toute première définition de ce terme est issue de la loi-cadre 75-442 du 15 juillet 1975. Elle définit un déchet comme étant « toute substance ou tout objet dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se débarrasser ». Mais selon la loi 75-663 du 15 juillet 1975, un déchet est également : « tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produits ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon ». A l'heure actuelle, au niveau national, cette définition change pour se rapprocher de celle donnée par la Communauté Européenne pour donner : « toute substance ou tout objet, ou plus généralement tout bien meuble, dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se débarrasser » au sens de l'article L 541-1-1 du code de l'environnement. Le rôle de la Communauté est d'essayer de mettre en place une certaine cohésion entre les différents états membre afin d'avoir une législation commune. De nos jours, la définition du mot déchet est encore sensible et sujette à différentes interprétations. Le but de ces définitions et de leur affinage est de tendre vers un vocable qui aura la même signification, la même compréhension pour tous les Etats Membres.

Par ailleurs, il peut être cité qu'un déchet est selon différentes sources académiques considéré comme quelque chose de sale, encombrant, impropre à la consommation, inutile, dénué de valeur, résultant d'une perte ou d'une diminution de qualité ou encore rejeté ou stocké à l'extérieur du système vital d'un organisme (sueur, urée...). Il semble à la suite de ces définitions que plusieurs notions sont extraites. Le terme de déchet peut par conséquent être abordé sous différents angles ou approches. Un déchet peut être donc vu principalement sous une approche réglementaire, soit selon la Communauté Européenne, soit selon la loi française ; ou sous une approche environnementale car un déchet constitue une menace à partir du moment où il entre en contact avec l'environnement ; ou sous une approche économique, il peut être une matière ou un objet dont la valeur économique est nulle ou négative pour son détenteur mais qui ne le sera pas pour une autre personne à un moment et à un lieu donné ; ou encore sous une approche sociale. En effet un déchet peut être générateur de lien social et d'emplois à l'image des « catadores » au Brésil qui ont su revendiquer et faire évoluer leurs convictions en engouement national par la création d'une fondation (France liberté).

Enfin, un déchet peut être vu sous une approche fonctionnelle où il sera considéré comme un flux de matière issu d'une unité fonctionnelle (activité ou ensemble d'activités)... . C'est principalement sous cette approche que nous allons nous orienter tout au long de ce rapport. Nous prendrons pleinement le temps de développer cette vision et les vocables utilisés au sein des chapitres suivants.

Comme présenté, plusieurs approches et considérations sont possibles en termes de déchets. Ces approches se différencient selon le point de vue abordé mais dépend essentiellement du vouloir du détenteur. En effet, le mot même de déchet peut être

contesté selon le désir ou non du détenteur de se défaire dudit objet. Dans ce manuscrit, nous considérons qu'un déchet à la base peut donner naissance à un grand nombre de produits économiquement valorisables et par conséquent que tout ce qui est issue de la transformation d'un déchet à un fort potentiel énergétique et/ou organique. Ces observations sont menées autour de deux objectifs : la maximisation énergétique et « zéro » déchets en enfouissement. Mais au vu de la diversité des déchets existants, il est important de s'intéresser à leur typologie.

II.1.3 **Les typologies de déchets**

Les déchets sont de natures, d'origines, de caractères physico-chimiques, et de toxicités très différents, autant de paramètres permettant leur classification. Les principales classifications sont celles utilisant les origines et les propriétés physico-chimiques des déchets. Nous présentons ici, ces différentes classifications pour tous types de déchets confondus.

II.1.3.1 **Typologies selon leurs origines**

Il faut entendre par origine des déchets, leur lieu de production qui pour simplifier la classification peuvent être rassemblés en trois grands groupes comme décrit ci-dessous :

- **Les déchets municipaux**, déchets dont la responsabilité de la collecte et du traitement incombe aux communes. Ils sont définis comme les déchets ménagers ainsi que les déchets de commerces, d'entreprises, ou d'autres déchets qui, de par leur nature ou leur composition, se rapprochent des déchets ménagers.
- **Les déchets d'entreprises**, sont des déchets industriels inertes essentiellement composés de minéraux stables (déblais), les déchets industriels banals (DIB) identiques aux déchets ménagers et les déchets industriels spéciaux (DIS) ou dangereux (amiante, plomb...) dont la toxicité nécessite un traitement particulier.
- **Déchets agricoles, d'élevages et de l'industrie agro-alimentaire** : cannes, pailles, feuilles, fumiers, lisiers, déchets d'abattoirs, de charcuterie, tanneries (os, sang, peaux, cuire, graisse, saindoux, déchets de transformation, de meunerie...), mais aussi tous les déchets d'emballages liés à ces activités.

II.1.3.2 Typologies selon la nature physico-chimique

La classification des déchets selon la nature physico-chimique permet de les identifier en fonction de leur inertie, de leur capacité à être valorisés, de leur dangerosité, et également en fonction de leur propriété de biodégradabilité. Cette typologie regroupe cinq catégories :

- **Déchets inertes** : déchets qui au cours du temps ne subissent aucunes modifications physique, chimique ou biologique importantes. Ils ne se décomposent pas, ne brûlent pas et ne produisent aucune réaction physique ou chimique. Ils ne sont en aucune manière susceptible de produire une pollution environnementale ou de nuire à la santé humaine (art L 541-8 C .Env). Ils sont toujours composés de matières minérales. Ils proviennent principalement des chantiers du bâtiment et des travaux publics et de certains secteurs industriels.
- **Déchets banals** : déchets municipaux et industriel, ils sont susceptibles d'être valorisés par recyclage, par fermentation ou par action thermique avec récupération d'énergie. Ils ne sont ni toxiques, ni dangereux mais peuvent être à l'origine de pollution s'ils ne sont pas gérés de manière contrôlée.
- **Déchets toxiques ou dangereux** : regroupent les DIS, les déchets ménagers spéciaux (DMS) ou des déchets produits par le monde agricole (produits phytosanitaires), ou encore les déchets radioactifs. Ces déchets sont traités indépendamment des autres types de déchets selon différents procédés adaptés à leur composition. Autrement dit, « *tout déchet qui présente une ou plusieurs des propriétés de dangers énumérées à l'annexe I au présent article. Ils sont signalés par un astérisque dans la liste des déchets de l'annexe II au présent article.* » (art L 541-8, C.Env).
- **Déchets ultimes** : déchets qui ne sont plus valorisables, ni par recyclage, ni par valorisation énergétique. Un déchet ultime est : « *un déchet qui n'est plus susceptible d'être réutilisé ou valorisé dans **les conditions techniques et économiques du moment**, notamment par extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux.* » (Art L 541-1 C.Env).

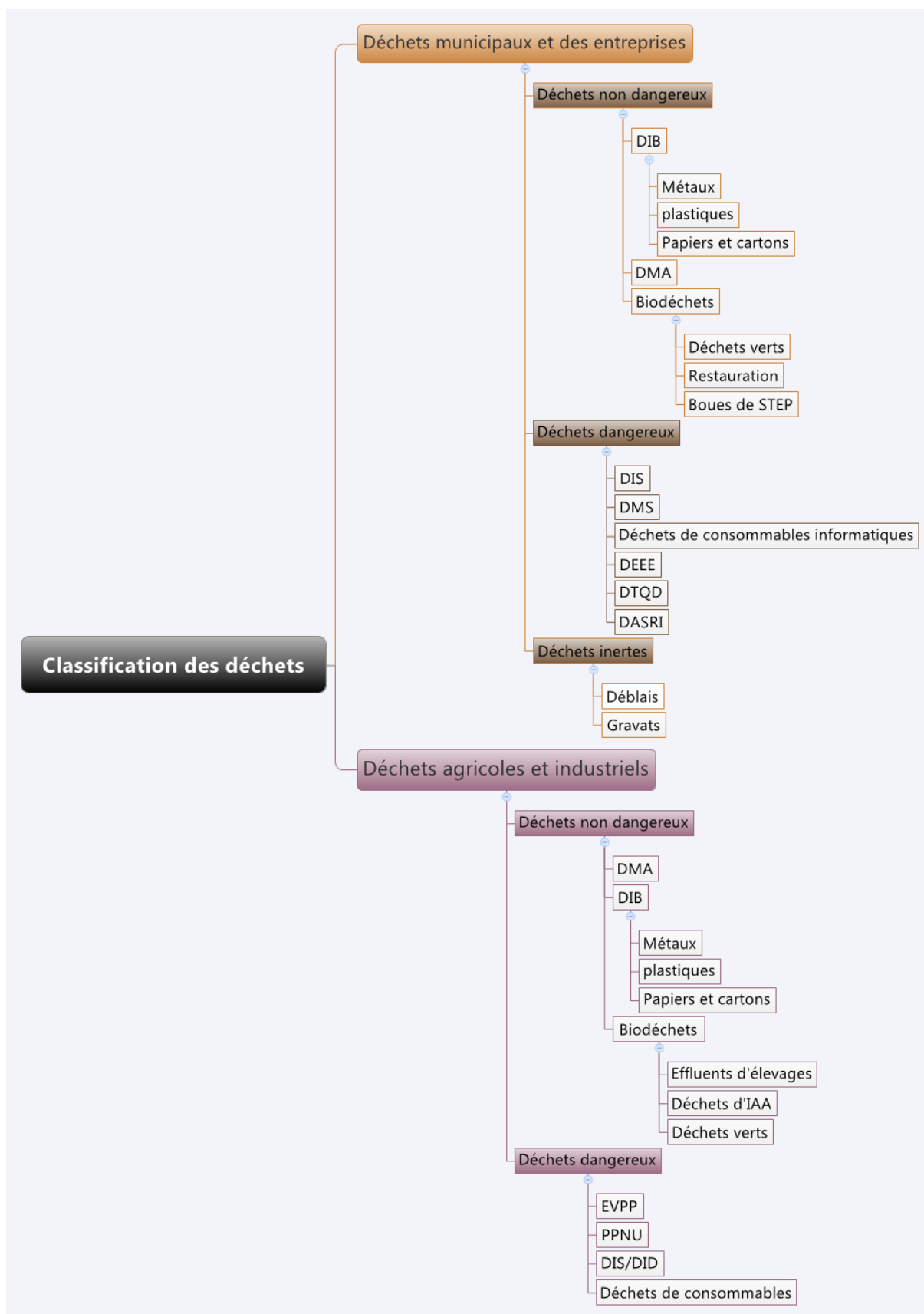


Figure 5 : Classification considérée dans le manuscrit

- **Et déchets organiques ou biodéchets** : « *tout déchet non dangereux biodégradable de jardin ou de parc, tout déchet non dangereux alimentaire ou de cuisine issu notamment des ménages, des restaurants, des traiteurs ou des magasins de vente au détail, ainsi que tout déchet comparable provenant des établissements de production ou de transformation de denrées alimentaires* » (art. R. 541-8). Ces déchets sont sujets au phénomène de biodégradabilité (de la matière organique). A la Réunion, les ordures ménagères contiennent une fraction fermentescible d'environ 27% de leur poids humide (MODECOM, 2007).

Généralement, les typologies selon la nature sont regroupées en trois catégories basées sur leur caractéristique toxique et par conséquent sur leur capacité à engendrer des risques pour la santé de l'homme et de l'environnement. Ces catégories sont les suivantes : déchets dangereux, déchets non dangereux (banals et biodéchets) et déchets inertes ou selon leur caractère fermentescible ou non ou encore solide ou liquide (Figure 5). Mais il est également possible de se référer à la nomenclature européenne.

II.1.3.3 Nomenclature européenne

Tous ces déchets sont finalement identifiés et répertoriés dans une nomenclature détaillée dans le Catalogue Européen des Déchets (CED) (annexe Commission européenne n° 94/3/CEE du 20 décembre 1993). Ce catalogue constitue la liste unique des déchets (dangereux et non dangereux) transposé dans l'avis du 11 novembre 1997 relatif à la nomenclature des déchets. Les déchets cités dans la liste sont considérés comme déchets après avoir répondu à la définition de « déchets » de l'article L541-1 du code de l'environnement.

La nomenclature se compose par un code à six chiffres comme par exemple : **20 02 01** déchets biodégradables de jardins et de parcs. Au total, la présente nomenclature se constitue de 20 catégories d'origine (1^{er} et 2nd chiffre), de 120 regroupements intermédiaires (3^{ème} et 4^{ème} chiffre) et de 645 désignations de déchets (5^{ème} et 6^{ème} chiffre). Il faut cependant savoir que cette liste n'est pas exhaustive et qu'elle fait l'objet de réexamens périodiques sur la base de nouvelles connaissances. Le détail de cette nomenclature est présenté en annexe 1.

Au cours de ce manuscrit, nous nous intéressons tout particulièrement aux biodéchets (déchet non dangereux) selon une typologie d'origine à savoir, des ménages et des collectivités, des industries et de l'agriculture. L'approche des typologies de déchets permet de visualiser la complexité pouvant exister et l'articulation que peuvent avoir ces typologies les unes avec les autres. Et c'est notamment autour de cette organisation que c'est construite la législation et le cadre juridique des déchets. Le cadre juridique peut être visualisé comme le chef d'orchestre en matière de gestion des déchets.

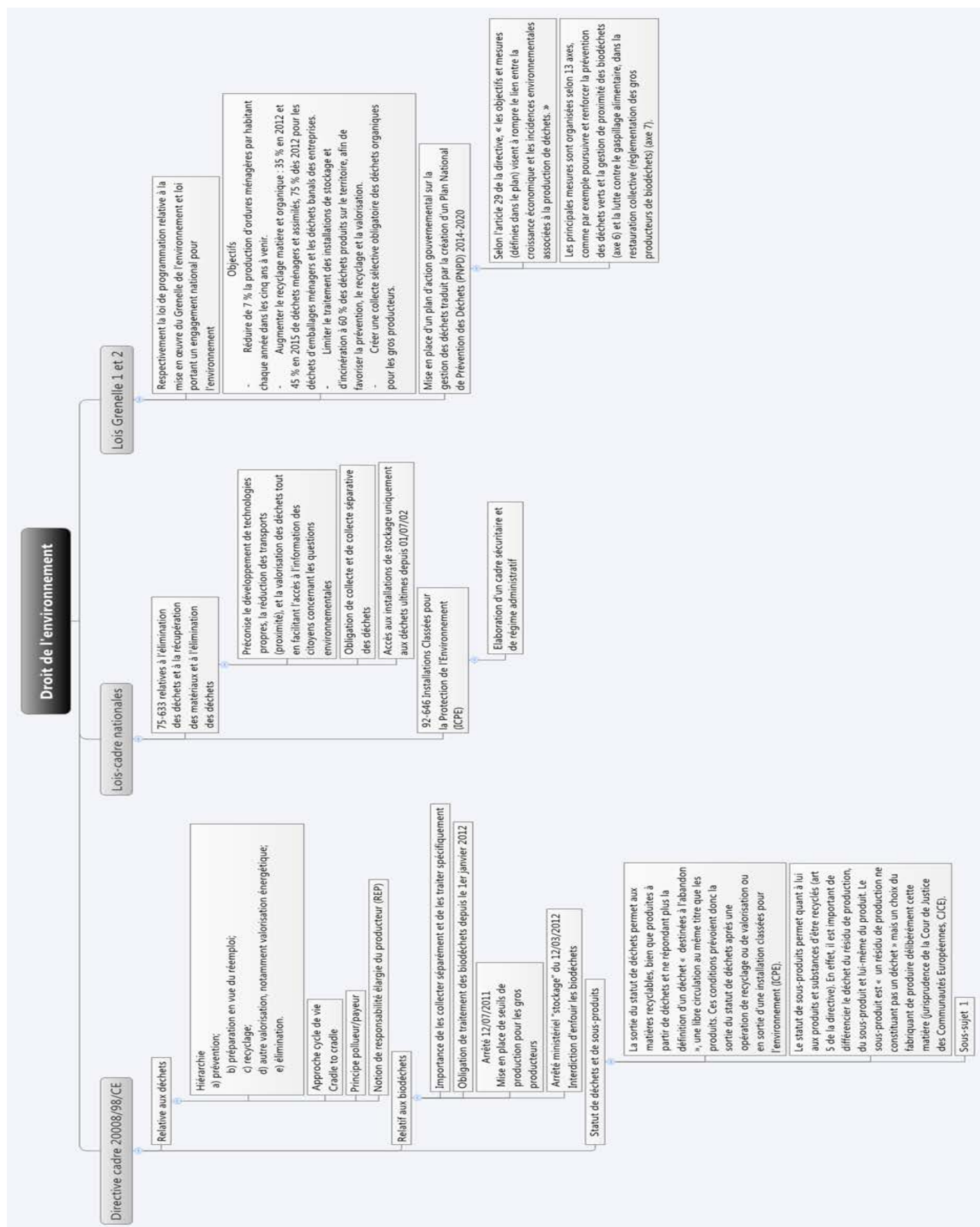


Figure 6 : Synthèse de la réglementation autour des déchets

II.1.4 **Le cadre juridique des déchets**

Le cadre juridique des déchets est appréhendé selon plusieurs échelles géographiques : internationales, Européennes, Française et en fin locale notamment à travers le droit de l'environnement. La Figure 6 présente une synthèse de la réglementation autour des déchets.

II.1.4.1 **Le droit de l'environnement**

Le droit français appliqué aux déchets est issu du « Droit de l'Environnement ». Le Droit de l'Environnement est un outil permettant d'étudier le droit relatif à l'intégration des activités humaines dans le milieu naturel. Ce droit se compose de grands principes. Ces principes s'appliquent au niveau international et communautaire et doivent être retranscrit explicitement ou implicitement dans tous les textes de loi ainsi que dans toutes les actions, activités ayant un rapport avec l'environnement. Ces principes ont été dans leur majorité rédigés et fondés au Sommet de Rio dans un même objectif : « ***La protection de l'environnement est un intérêt commun pour l'humanité*** ». Ces grands principes sont aux nombres de 7.

Le plus ancien et fondateur est **le principe de développement durable**. Ce principe correspond à une notion ancienne celle de conservation. Le but de ce principe est de permettre l'exploitation maximale des ressources renouvelables ou pas de façon à ne pas compromettre l'existence et le maintien de ces ressources. Il s'agit par conséquent de répondre aux besoins présents sans nuire à la capacité des générations futures à répondre aux leurs.

Les autres principes sont ceux de protection, prévention, précaution, pollueur-payeur, participation, intégration, d'autosuffisance et de proximité et enfin d'information du public. Ces principes visent à éviter et prévenir tous risques de pollution en intégrant ces notions dans les décisions politiques et actions communautaires afin de promouvoir le développement durable et à en faire assurer les dommages au pollueur. Il impose également aux Etats membres de gérer leurs déchets dans un « **réseau intégré et adéquat d'installations d'élimination des déchets** ». Cela afin de permettre à la Communauté d'être **autosuffisante en matière d'élimination des déchets** tout en restant au **plus proche du lieu de génération** et dans un lieu **adapté au type de déchets**. Et enfin, les citoyens doivent être informés de tous dangers et participer aux interrogations environnementales. Il est du droit de chacun de vivre dans un environnement propre et d'en assurer sa santé et son bien-être.

Il semblait important de développer ce point sur le droit de l'environnement afin d'appréhender au mieux les enjeux et ainsi les objectifs visés. **Nous retiendrons particulièrement les notions de réseau intégré, d'autosuffisance et de proximité, le tout dans une gestion adaptée au déchet traité.** Ces notions constituent la base et l'essence même des scénarios que nous souhaitons proposer au territoire réunionnais et principalement dans un contexte d'insularité. Le cadre général posé, nous pouvons présenter dans un objectif de synthèse les actions et la

législation relatives aux déchets aux échelles Européenne, Française et Réunionnaise.

II.1.4.2 Le cadre juridique relatif aux déchets

Les actions et cadre réglementaires relatif aux déchets sont présentés pour l'Europe, La France et La Réunion. Nous synthétisons ces aspects de manière à conserver ce qui nous concerne particulièrement dans notre étude.

II.1.4.2.1 Au niveau européen

Deux textes européens sont fondateurs du cadre relatif aux déchets, il s'agit de la directive cadre 75-442 qui fut abrogée par la directive cadre 2008/98/CE actuellement en vigueur. La directive 2008/98/CE reprend les principes et termes énoncés dans la directive cadre 75-422 en apportant de nouveaux concepts et définitions.

La directive 2008/98/CE du 19/11/08 relative aux déchets a été mise en place dans le but de protéger l'environnement et la santé humaine par la prévention et la réduction quantitative et qualitative des déchets en assurant une utilisation rationnelle des ressources naturelles. Cette directive privilégie **l'approche par cycle de vie** en prenant en compte la question des déchets dès la conception des produits qui vont les générer. Cette approche fait référence au mouvement *to cradle to cradle* (Cf.I.2.3.1). De ce fait, elle établit un ordre de priorité en matière de prévention et de gestion des déchets (hiérarchie) qui devra être mise en œuvre dans la législation et la politique des États membres

La réglementation européenne vise également à faciliter la collecte séparée et le traitement spécifique des biodéchets. Il importe conformément à la hiérarchie des déchets et aux fins d'une réduction des émissions de gaz à effet de serre des installations de stockage : i) de faciliter la collecte séparée des biodéchets et ii) leur traitement approprié afin de produire du compost et d'autres matières ne présentant aucun risque pour l'environnement (chapitre III, art 22 de la directive 2008/98/CE). De plus, depuis le 1^{er} janvier 2012, le tri à la source, la collecte séparée et la valorisation biologique des biodéchets et des huiles alimentaires usagées (HAU) sont obligatoires pour les gros producteurs (art L 541-21-1 du code env). On entend par gros producteurs, « *les détenteurs d'une quantité importante de biodéchets (...) supérieures aux seuils fixés par l'arrêté du 12 juillet 2011* » (art R 543-225 code env). Ces seuils sont dégressifs allant d'une obligation de traitement pour les producteurs de plus de 120t/an en 2012 à 10t/an en 2016. A cette réglementation vient s'ajouter l'arrêté ministériel « stockage » du 12/03/2012 qui vise à renforcer l'interdiction d'accepter les biodéchets y compris les déchets verts et les papiers en unité de stockage.

Il en ressort de ces réglementations deux points, premièrement l'importance du choix de traitement des déchets et deuxièmement l'intérêt porté par le gouvernement de traiter spécifiquement et à part les biodéchets. De plus comme précisé précédemment, nous nous positionnons selon une approche fonctionnelle qui nécessite l'observation de tous les entrants et sortants d'un système de

traitement afin de considérer l'ensemble des déchets et produits de transformation. C'est dans cette optique qu'il est important de préciser les notions et les statuts de déchets et de produits.

II.1.4.2.2 Au niveau national

Les textes fondateurs sont aux nombres de deux : la loi cadre 75-633 et la loi 92-646. Ces lois sont respectivement relatives à l'élimination des déchets et à la récupération des matériaux et à l'élimination des déchets ainsi qu'aux installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE). Ces textes reprennent les objectifs de traitement de la directive européenne en définissant les priorités d'élaboration d'un système de régimes des ICPE et développement de technologies propres, la réduction des transports (proximité), et la valorisation des déchets tout en facilitant l'accès à l'information des citoyens concernant les questions environnementales..

II.1.4.3 Les actions et les plans qui découlent du cadre juridique

De la directive 2008/98/CE ont découlé notamment au niveau national les lois Grenelle 1 et 2. Ces lois ont permis intégrer un certain nombre d'objectifs concernant la gestion des déchets. De ces lois ont été déclinés un certain nombre de plans d'action au niveau local afin de répondre au mieux aux nouveaux objectifs et orientations gouvernementales.

II.1.4.3.1 Au niveau national

La loi Grenelle 1, loi n°2009-967 du 3 août 2009 (JO du 5 août 2009) est la loi de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement. Elle définit dans son article 46 la politique à suivre pour la gestion des déchets. La loi dite Grenelle 2 du 12 juillet 2010 (JO du 13 juillet 2010) est une loi portant un engagement national pour l'environnement. Elle est constituée de 25 articles entièrement dédiés aux « dispositions relatives aux déchets. Les objectifs développés s'inscrivent particulièrement dans le respect de la hiérarchie des modes de gestion, mais également sur le recours à l'éco-conception.

II.1.4.3.2 Au niveau local

Plusieurs plans et actions sont réalisés en accord avec la hiérarchie des normes comme : le PPGDND imposé par la loi Grenelle, le programme local de prévention des déchets, le programme d'autonomie énergétique de l'île d'ici 2030, les plans d'aménagements locaux, le schéma Régional du Climat, de l'air et l'Energie de la Réunion et enfin le schéma départemental de gestion et d'élimination des boues de station d'épuration.

II.1.4.3.2.1 Le plan de prévention départemental et de gestion des déchets non dangereux

Le PPDGDND doit présenter dans un premier temps, l'état des lieux des filières gérant les déchets non dangereux, puis dans un deuxième temps, les orientations des nouvelles gestions à mettre en place sous forme de scénarios. Ce sont ces

scénarios de gestion que nous avons choisis d'exposer ici. Ces orientations sont importantes afin d'appréhender au mieux les objectifs locaux. Trois orientations ont été retenues (extrait PPDGDND) :

- Orientation 0 : réduction des OMR par stabilisation avant stockage. Il s'agit du scénario de base permettant une comparaison entre scénarios avec et sans valorisation énergétique,
- Orientation 1 : mise en place de la valorisation énergétique sur le territoire et maximisation de la production énergétique,
- Orientation 2 : mise en place de la valorisation énergétique sur le territoire et recours partagé à la valorisation organique (FFOM) et à la valorisation énergétique,
- Orientation 3 : mise en place de la valorisation énergétique sur le territoire et stockage de la fraction organique après stabilisation.

Les synopsis de ces scénarios sont présentés en annexe 2. Nous reviendrons sur la situation actuelle de la gestion des déchets et des projets à mettre en place pour améliorer la situation dans le contexte réunionnais. Ces scénarios sont importants à prendre en compte puisqu'ils nous serviront de base dans l'élaboration de nos propres scénarios de gestion (Cf. chapitre 5).

II.1.4.3.2.2 Le projet GERRI

Le projet GERRI (Grenelle de l'environnement à la Réunion : Réussir l'innovation - Green Energy revolution : Reunion Island) se fixe pour ambition de faire de La Réunion, d'ici 2030, un territoire d'exception intégrant de toutes les innovations environnementales notamment pour l'énergie et ses usages. Le projet vise à développer la recherche et les innovations en termes d'énergies renouvelables. Ce projet, dissous en 2013, a été repris pour la plupart des actions en cours par la Région Réunion au travers d'une société publique locale (SPL) nommée Energie Réunion. Comme précisé dans l'introduction générale, notre étude s'intègre pleinement dans ce projet.

II.1.4.3.2.3 Les plans locaux de prévention

Les plans locaux de prévention (PLP) sont établis par EPCI en charge des déchets de plus de 20 000 habitants. Ils visent à détailler les objectifs de prévention des déchets et les actions à mettre en place pour les atteindre. Les EPCI se sont mis d'accord à l'unanimité pour réduire leur production de 7% pour des horizons allant de 2014 pour la CIVIS à 2016 pour la CASUD et la CIREST, tandis que la CINOR et le TCO se positionne sur 2015 conformément aux lois Grenelle.

II.1.4.3.2.3.1 Le Schéma régional climat, air et énergie (SRCAE)

Le SRCAE élaboré par l'Etat et la Région vise à proposer des orientations permettant de réduire globalement les émissions de gaz à effet de serre, de

développer les énergies renouvelables, de maîtriser la demande en énergie et d'adapter le territoire aux évolutions climatiques.

La Région, en lien avec l'ADEME et l'EDF cherchera à limiter les appels de puissance sur le réseau de la consommation énergétique globale tout en favorisant le développement des énergies renouvelables aux différentes échelles d'installation : chez les particuliers s'agissant de l'eau chaude solaire et du photovoltaïque, à l'échelle d'une exploitation agricole pour de premières expérimentations de méthanisation ou de gazéification, à un niveau industriel pour les énergies marines, la méthanisation et la gazéification de la biomasse.

II.1.4.3.2.3.2 Le schéma départemental de gestion et d'élimination des boues de stations d'épuration de la Réunion

Le schéma donne des orientations générales permettant de résoudre la problématique des boues d'épuration du département tant sur le plan du respect de la réglementation que sur les plans économiques et techniques. Ce schéma fixé depuis 2001, est en cours de révision depuis 2013. Ce schéma préconise le traitement des boues par une valorisation organique à hauteur de 30% et une élimination par combustion à hauteur de 70%. Les orientations pour ce gisement sont : le co-compostage avec les déchets verts, la co-incinération avec les OMR ou encore leur épandage afin de réduire au maximum leur stockage. Ce schéma nécessite d'être en accord avec les divers projets de réaménagement des stations de l'île et les projets d'aménagements d'unité de traitement du PPDGDND.

Au vu de la réglementation plusieurs points sont à prendre en considération en matière de gestion des déchets. Premièrement, il est primordial de collecter et de gérer les biodéchets séparément des autres flux. Deuxièmement que leur valorisation doit respecter la hiérarchie de gestion en favorisant la valorisation énergétique et organique selon une approche de cycle de vie. Et troisièmement, que toute cette gestion doit s'effectuer en respectant les principes fondateurs du droit de l'environnement à savoir une gestion de proximité, d'autosuffisance et dans un réseau intégré d'unités adaptées au traitement de ces déchets. C'est en considérant l'ensemble de ces réglementations que nous orienterons les propositions de scénarios. Une fois, ces notions approfondies autour de ce qu'est un déchet et de l'importance de le gérer de manière raisonnée, l'accentuation de la prise de conscience s'effectue sur les faits chiffrés aux échelles internationale, européenne, nationale et locale.

Tableau 1 : Synthèse de la production des déchets par région en 2012 et la production estimée pour 2025

Summary by Region								
Region	Number of Countries Included	Current Available Data			Projections for 2025			
		Total Urban Population (millions)	Urban MSW Generation		Projected Population		Projected Urban MSW Generation	
			Per Capita (kg/capita/day)	Total (tonnes/day)	Total (millions)	Urban (millions)	Per Capita (kg/capita/day)	Total (tonnes/day)
AFR	42	261	0.65	169,120	1,153	518	0.85	441,840
EAP	17	777	0.95	738,959	2,124	1,230	1.52	1,865,380
ECA	19	227	1.12	254,389	339	240	1.48	354,811
LCR	33	400	1.09	437,545	682	466	1.56	728,392
MENA	16	162	1.07	173,545	379	257	1.43	369,320
OECD	27	729	2.15	1,566,286	1,032	842	2.07	1,742,417
SAR	7	426	0.45	192,411	1,939	734	0.77	567,545
Total	161	2,982	1.19	3,532,255	7,648	4,287	1.42	6,069,705

(Source : Hoornger et Badha Tata, 2012)

Tableau 2 : La production de déchets en Europe en 2010 exprimée en million de tonnes

	Déchets produits par les activités économiques et les ménages		Agri-culture, sylviculture et pêche (section A)	Énergie (section D)	Autres activités économiques (sections E et G à U)	Ménages
	Total	dont: dangereux				
UE-27 (1)	2 569 850	94 460	39 570	84 880	362 630	220 940
Belgique	44 256	1 992	277	1 243	24 461	4 798
Bulgarie	165 877	13 542	618	8 032	1 231	2 396
Rép. tchèque	23 758	1 363	114	1 540	5 099	3 334
Danemark	14 033	1 338	77	213	7 009	3 390
Allemagne	363 545	19 931	256	9 087	53 426	36 312
Estonie	19 000	8 962	110	6 534	1 320	430
Irlande	19 808	1 972	101	334	10 578	1 730
Grèce (2)	68 644	253	0	11 181	2 826	3 954
Espagne	137 519	2 991	5 817	2 339	20 006	23 198
France	355 081	11 538	1 682	993	41 439	29 307
Italie	179 034	6 655	349	3 090	29 043	32 472
Chypre	2 373	37	129	3	198	461
Lettonie	1 495	67	75	20	278	606
Lituanie	5 583	110	456	68	782	1 261
Luxembourg	10 440	379	3	2	803	385
Hongrie	15 735	541	488	2 718	3 372	2 865
Malte	1 288	17	3	1	149	138
Pays-Bas	119 142	4 565	3 948	1 156	12 253	9 091
Autriche	34 883	1 473	550	453	17 019	4 623
Pologne	159 458	1 492	1 543	20 291	17 751	8 890
Portugal	38 347	1 625	193	456	10 193	5 464
Roumanie	218 830	703	18 353	5 888	3 438	6 127
Slovénie	5 096	117	141	558	691	728
Slovaquie	10 545	437	526	878	2 759	1 719
Finlande	104 337	2 559	2 772	1 445	3 732	1 681
Suède	117 618	2 515	309	1 479	5 551	4 038
Royaume-Uni	334 127	7 285	681	4 885	87 223	31 539
Liechtenstein	62	2	0	0	35	0
Norvège	9 433	1 763	195	28	2 385	2 229
Croatie	668	45	0	1	509	0
ARY de Macédoine	2 328	150	0	4	0	451
Serbie	33 623	11 145	0	6 019	0	0
Turquie (3)	64 765	1 018	0	25 525	50	28 454

(1) À l'exclusion de la Grèce pour la section A et la classe 46.67 de la NACE.

(2) Le total et les autres activités économiques n'incluent pas la section A et la classe 46.67 de la NACE.

(3) 2008.

(Source : Eurostat, 2014)

II.1.5 **L'actualité des déchets en chiffre**

II.1.5.1 La production des déchets à l'international

La production de déchets au monde n'est pas facile à estimer mais certaines estimations indiquent un chiffre de l'ordre de 4 milliards de déchets produits par an, tous déchets confondus, soit environ 1,9 milliards de déchets municipaux en 2012 (Hoornger et Badha Tata, 2012) (Tableau 1). Cette production correspond à environ 600 kg /hab/an pour un européen contre 700 kg/hab/an pour un américain et enfin contre 200 kg/hab/an pour un pays du en voie de développement.

II.1.5.2 La production des déchets en Europe et en France

La production totale de déchets en Europe tous flux confondus est de 2 570 millions de tonnes en 2010, dont 220 940 sont issus des ménages (Tableau 2). L'Allemagne est le pays le plus producteur de déchets avec 363 millions de tonnes, tout juste suivie par la France. Loin derrière la France, l'Italie produit 179 millions de tonnes de déchets. Ces chiffres, nous font prendre conscience de l'importance de la production des déchets et de l'importance d'une **gestion optimisée**. La production de déchets en France métropolitaine est de 355 millions de tonnes en 2010 dont 43 millions de tonnes de déchets non dangereux, soit environ 5,3 t/hab. 47 millions de tonnes de biodéchets (hors déchets de l'agriculture et de la pêche) sont produits en 2010 dont 20 millions sont collectés par les services publics (Tableau 3).

Tableau 3 : La production de biodéchets en France métropolitaine en 2010

Déchets organiques	En millions de tonnes
Déchets collectés par le service public	20,2
Déchets de cuisine	6,8
Papiers-cartons, textiles sanitaires	7,5
Déchets verts	5,9
dans les OM	1,2
en déchèteries	3,5
collectés en porte à porte	1,2
Déchets organiques en gestion domestique	5,7
Autres déchets organiques	21,1
Déchets verts des collectivités	1
Boues de stations d'épuration (STEP)	9
Marchés	0,4
Déchets verts des entreprises	3,2
Commerces alimentaires	0,8
Restauration	1,1
Industries agroalimentaires (IAA)	3
Papetiers	1,8
Autres industries	0,8
TOTAL	47

(Source : ADEME, 2014)

II.1.5.3 *La production des déchets à la Réunion*

Concernant la production des déchets à la Réunion, seuls deux documents présentent les caractéristiques du gisement de biodéchets, à savoir le PPGDND de 2014 (Tableau 4) et le MODECOM de la Réunion (campagne de caractérisation des déchets en 2008 menée par l'ADEME). Le premier relate l'aspect quantitatif du gisement et le descriptif des flux répertoriés tandis que le second expose l'aspect qualitatif des déchets au travers des différents types de collecte (ordures ménagères, recyclables, encombrants et déchets verts).

Tableau 4 : Les tonnages de déchets organiques recensés à la Réunion

	DMA (tonnages collectés) (2011)	DAE (tonnages estimés) (2011)	Total
OMR	236 096		236 096
Biodéchets⁷	5 293	10 100	18 093
Déchets verts	149 902	4 200	154 102
Effluents agricoles		752 144	752 144
HAU		2 700	2 700
Déchets graisseux		7 000	7 000
Déchets industriels et d'IAA⁸		376 000	376 000
Total	391 291	1 152 144	1 543 435

(Source : PPDGDND, 2014)

⁷ Collecte des biodéchets des restaurateurs mise en place sur le TCO.

⁸ Les déchets industriels et d'IAA comprennent les vinasses de distillerie (150 000t/an), les écumes de sucrerie (79 000 t/an), les cendres de bagasses et de charbons des centrales thermiques (100 000 t/an) et les boues de STEP industrielles et autres déchets (47 000 t/an).

Les chiffres concernant la production des biodéchets, nous serviront pour la construction de notre propre base de données et nous utiliserons les données du MODECOM comme référence dans la construction de la base (Cf. Chapitre 4). C'est pourquoi, nous avons choisis de les exposer. Le MODECOM a déterminé une composition de biodéchets d'environ 27,94% de déchets putrescibles dans les OMR et 1,42% dans la collecte sélective (Tableau 5)

La production de déchets et surtout l'impact que pourrait avoir seulement le détournement des biodéchets est considérable. C'est pourquoi, la partie qui suit s'attache à définir le générique de « gestion des déchets » autour notamment des acteurs et des nouveaux courants de pensée visant à performer cette démarche.

Tableau 5 : Composition (%) des OMR et de la CS

Catégories	OMR	CS
	(moyenne campagne)	(moyenne campagne)
Déchets putrescibles	27,94%	1,42%
Déchets alimentaires	13,63%	
Déchets de jardin	14,31%	
Papiers	13,12%	50,22%
Emballages papiers	0,15%	
Journaux	2,82%	
Magazines	1,51%	
Autres papiers	5,64%	
Imprimés non adressés	3%	
Cartons	8,33%	23,92%
Cartons plats	4,77%	
Cartons ondulés	3,23%	
Autres cartons	0,33%	
Total matières compostables	49,40%	75,56%

(Source : MODECOM, 2008)

II.2 La gestion des déchets

La gestion des déchets est un problème actuel et un enjeu essentiel pour notre avenir et celui de la planète au vu des quantités produites. En effet, les déchets participent activement à dégrader l'environnement de par la diversité des pollutions qu'ils peuvent engendrer. Si des problèmes tels que le gaspillage des ressources primaires constituent une menace pour l'environnement, la mauvaise gestion des ordures y contribue également. Il est donc primordial de prendre en charge nos déchets de manière responsable et respectueuse de l'environnement. De plus, depuis la Conférence de Rio, nous sommes tous engagés dans une démarche de développement durable qui comme le cite Mme Gro Harlem Brundtland est: « un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs ». De ce fait, une gestion optimale des ordures est indispensable.

II.2.1 Qu'est-ce que la gestion des déchets ?

Nous connaissons tous cet adage qui dit que « le meilleur déchet est celui qui n'existe pas ! ». Il est à partir de cette constatation nécessaire de préserver les matières premières tout en les réutilisant. C'est cette notion qui va conditionner toute la chaîne de traitement rassemblée sous le terme « gestion des déchets ». Ici, c'est en fonction de leurs natures qu'ils vont être acheminés vers différents types de collectes et procédés de traitement, de valorisation et d'élimination.

Comme précisé, nous nous intéressons particulièrement à la gestion des déchets (GD). Mais à quoi correspond ce vocable. Il s'agit d'un terme générique qui décrit plusieurs étapes (Figure 1) que l'on peut rassembler sous deux termes : la prévention et la gestion des déchets

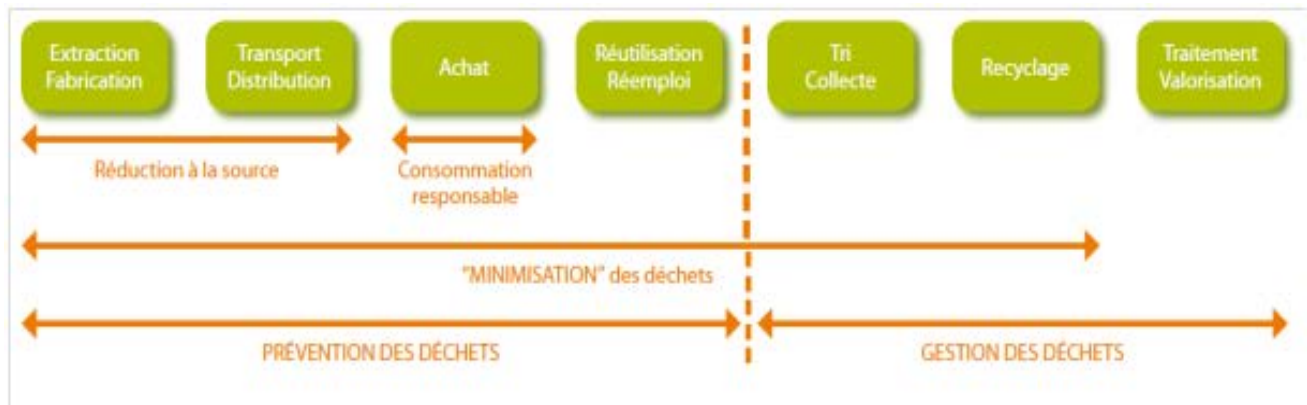


Figure 1 : Représentation des étapes constituant la prévention et la gestion des déchets

(Source : ADEME, 2008)

Nous pouvons voir sur la figure que la gestion des déchets commence par le tri et la collecte, se poursuit avec le recyclage et se termine par le traitement et la valorisation des déchets restant, à l'image de la hiérarchie des déchets définie par la directive 2008/98/CE du 19/11/08.

La gestion des déchets se définit au sens de l'article 541-1-1 du Code de l'Environnement comme étant : « *La collecte, le transport, la valorisation et, l'élimination des déchets et, plus largement, toute activité participant de l'organisation de la prise en charge des déchets depuis leur production jusqu'à leur traitement final, y compris les activités de négoce ou de courtage et la supervision de l'ensemble de ces opérations* ».

Au niveau de l'étape de valorisation trois catégories de valorisation des déchets peuvent être identifiées. Chaque type correspond à une catégorie de déchets considérant bien sûr différents modes de traitements possibles pour chacun d'entre eux :

- Le recyclage ou la valorisation matière s'adresse aux déchets dits recyclables (cartons, papiers, verre, emballages plastiques, boîtes métalliques...) mais également à tous les appareils électroménagers, les meubles, ...
- La valorisation énergétique s'adresse principalement aux déchets dits résiduels. Ce sont les déchets restant après le tri des déchets recyclables. Ces déchets selon l'équipement des communes seront traités soit via un procédé thermique (incinération ou gazéification), soit via le stockage. En fonction de la destination finale des déchets résiduels, différentes techniques sont utilisées afin de produire de l'énergie.
- Et la valorisation organique s'adresse aux déchets alimentaires et autres biodéchets. Cette valorisation consiste à produire des engrais ou amendements pour un retour au sol des déchets.

Il est également possible de combiner la valorisation et énergétique dans un même système de traitement afin d'optimiser les résultats. En effet, certains modes de traitement permettent à la fois la valorisation organique et énergétique des déchets.

Cette maîtrise de la gestion des déchets est importante et nécessaire aux vues de l'évolution des activités de production et de consommation. En effet, l'augmentation de la production et donc de produits susceptibles de devenir des déchets mais également la diversification des matériaux et sous-produits complexes rendent cette gestion difficile. Pour mener à bien cette gestion de nombreux acteurs sont présents. C'est pourquoi, nous nous attachons à les identifier afin de comprendre le rôle de chacun dans cette chaîne.

II.2.2 **Organisation des services**

La gestion des déchets fait appel à un nombre important d'acteurs répartis à plusieurs échelles afin d'assurer un bon relais des directives de l'Etat. Tout d'abord, les grandes lignes directives sont décidées au niveau européen puis traduit dans

l'Etat membre. C'est au travers du Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire (MEEDDAT) en charge de la protection de l'environnement que s'effectue cette traduction. Au niveau national, l'Etat est donc la plus haute institution imposant aux différents acteurs les conditions d'exercice de cette gestion. Les autres acteurs sont présentés dans les paragraphes qui suivent.

II.2.2.1 Les services déconcentrés de l'Etat

Les services déconcentrés sont chargés de relayer l'information dans les régions et départements. L'Etat a notamment chargé l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) d'assurer la mise en place des politiques publiques, dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable, et de ce fait, la politique nationale de gestion des déchets (art L.131-3 C.Env).

La direction régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL) constitue le relais du MEEDDAT. Elle est notamment chargée d'élaborer et mettre en œuvre les politiques de l'État en matière d'environnement, de développement et d'aménagement durables (**décret n° 2009-235 du 27 février 2009**).

Les Eco-organismes coordonnent un réseau de collecte et de traitement des déchets par des prestataires qualifiés toujours dans un objectif d'efficience environnementale.

Les régions et départements ont un rôle de planification. Ils doivent mettre en place des plans de gestion des déchets respectivement industriels et ménagers. Pour cela, ils doivent reprendre les objectifs nationaux et les adapter au contexte local (PPDGDND).

II.2.2.2 Les intercommunalités territoriales et structures d'intercommunalités

Les communes sont chargées d'assurer la collecte et le traitement des déchets suite aux lois. Ces communes ont le choix d'effectuer elles-mêmes ce service ou de le déléguer. A la Réunion, ces services ont été délégués à des Etablissements Publics de Coopérations Intercommunales (EPCI). Ces EPCI sont au nombre 5 assurant ensemble la gestion des déchets de l'île. Un syndicat mixte est également en cours de mise en place afin de regrouper les trois EPCI constituant le sud et l'ouest du territoire. Ce syndicat aura à charge, uniquement le pôle gestion des déchets dans un objectif de mutualisation des infrastructures et d'optimisation du système.

II.2.2.3 Autres acteurs

Les autres acteurs à considérer sont bien sûr tous les prestataires de services assurant physiquement la collecte et le traitement des déchets ainsi que les industriels qui sont à l'origine même des typologies de déchets présents sur la chaîne de gestion. Mais, nous pouvons citer et pas des moindres : le consommateur. Le consommateur a le pouvoir de choisir le produit dans un panel proposé, il a donc aussi une incidence importante sur les volumes engendrés et les

typologies de déchets. Il peut, par son action, modifier toute la chaîne de gestion. Ces notions sont fortes bien que trop négligées. L'éco-consommation peut réellement contraindre les scénarios de gestion mis en place, à l'image du tri des recyclables.

II.2.3 **Courant actuel**

Au vu du chaos environnemental actuel, les gouvernements révolutionnent leur système économique fonctionnant essentiellement selon un modèle linéaire vers un modèle circulaire. Nous nous attachons à relater ces courants de pensée afin de cerner les nouvelles volontés politiques et ainsi de pouvoir les intégrer à nos scénarios. Nous présentons aussi brièvement l'outil d'action de ce mouvement : l'écologie industrielle.

II.2.3.1 Economie circulaire

A l'heure où les ressources naturelles s'épuisent et où les volumes et la toxicité des déchets augmentent, il semble inévitable de repenser notre mode de vie basé sur la production et la consommation à outrance en ouvrant la porte aux préoccupations environnementales. Pour cela, cette tendance vise à passer d'un modèle économique linéaire à un mode économique circulaire par une utilisation efficace des ressources et plus respectueuse de l'environnement.

Ce concept vise à favoriser une croissance économique en accord avec l'environnement dans lequel elle évolue telle une symbiose plutôt que par un phénomène de parasitisme et d'exploitation. De par ce constat, il paraît naturel de s'inspirer du vivant tel une approche biomimétique. Il s'agit de copier le fonctionnement des organismes vivants qui se nourrissent de leur environnement en lui retournant ces nutriments sous différentes formes. Ce processus forme une boucle fermée intégrant une notion de régénération plutôt que d'épuisement. La nature ne conçoit pas de déchets tout est nutriments et ressources nécessaire à chaque étape du cycle. C'est de cela que les gouvernements tentent de se rapprocher. Ce mouvement de pensée ou plutôt de repensée porte le nom symbolique de « cradle to cradle » à l'image du célèbre adage de Lavoisier : « rien ne se perd, tout se transforme » dans un objectif de retourner à l'essence d'origine.

Cette « repensée » est une notion importante, il faut reconditionner notre mental afin de considérer que chaque produit ou sous-produit d'une chaîne de production soit vue comme un nutriment pouvant alimenter une autre chaîne de production... Deux catégories de nutriments peuvent être distinguées : les nutriments dits techniques et les nutriments dits organiques. Ils sont définis comme suit : « nutriments techniques » comprennent les matières premières non organiques et non nuisibles à l'environnement (les matières synthétiques mais non toxiques), tandis que les « nutriments biologiques » d'origine organique qui peuvent être compostés sans traitement spécifique reviennent nourrir les sols ». En résumé, il faut « des matériaux totalement sains qui retournent soit à la terre, soit à l'industrie pour être recyclés indéfiniment » expliquent McDonough et Braungart.

Le principe de mise en œuvre de ce modèle d'économie circulaire est l'écologie industrielle.

II.2.3.2 Industrie écologique

L'écologie industrielle est le nerf même de cet enjeu considérable. Pour introduire cette notion, il faut tout simplement l'amorcer dès la conception du produit. Il s'agit de revoir l'intégralité du processus de fabrication qui est majoritairement à l'origine des déchets. Une des étapes de la démarche d'écologie industrielle est la caractérisation des flux matières et énergie. L'outil communément utilisé pour faire ce bilan est l'analyse des flux matière et d'énergie (AFME) (technique de l'ingénieur, 2011). Cette approche permet de visualiser le fonctionnement du système de la matière première, de l'extraction, en passant par sa transformation en produit jusqu'à son élimination ou sa sortie du processus de production.

C'est en cela que cette notion d'écologie industrielle, nous intéresse. Elle propose dans un cadre bien précis, celui de l'industrie de fabrication d'analyser toute la chaîne afin d'en dénombrer les entrées et les sorties. Cette approche amène l'observateur à caractériser le processus comme un système complexe dans le but d'en améliorer la conception. C'est pourquoi, nous avons choisi d'orienter notre analyse des scénarios de gestion vers une approche systémique reflétant un certain nombre d'input et d'output. Cette méthode bien que pertinente n'en est pas moins subjectif car elle dépend fortement du regard de l'observateur et de son intérêt. Notre intérêt dans cette étude des scénarios de gestion est de caractériser les paramètres ou indicateurs nous permettant de répondre au mieux aux besoins du territoire considéré en tenant compte des objectifs environnementaux cités plus haut (cadre juridique).

Les besoins répertoriés pour la classification de nos scénarios sont :

- Les besoins en électricité,
- Les besoins en carburants,
- Les besoins en amendements et engrais,
- Et autres (matériaux de construction...).

Il est possible de regrouper ces besoins sous les combinaisons des besoins dits « énergétique » (électricité et carburant) et des besoins dits « organique » (amendements et autres). En plus de cette typologie des besoins, nous nous imposons deux objectifs, à savoir : la maximisation de la production d'énergie dans le but de contribuer à atteindre l'autonomie énergétique en 2025 et « zéro déchets » en enfouissement.

C'est au travers des approches étymologique, juridique, numérique et organisationnel autour des déchets et de leur gestion que nous avons pu clairement poser les objectifs à considérer dans cette étude. Il reste maintenant à définir les outils à disposition pour le traitement des déchets afin de construire nos différents scénarios. Pour l'appropriation des modes de traitement, un certain nombre

d'observations ont été menées. Ces observations, nous ont permis d'établir des typologies autour des phases de gestion mais surtout au niveau des différents modes. C'est au travers de cette projection que les modes de gestion seront décrits et présentés.

Un même raisonnement pourrait être conduit concernant les déchets inertes que nous n'aborderons pas au cours de notre recherche.

Organisation des filières de traitement

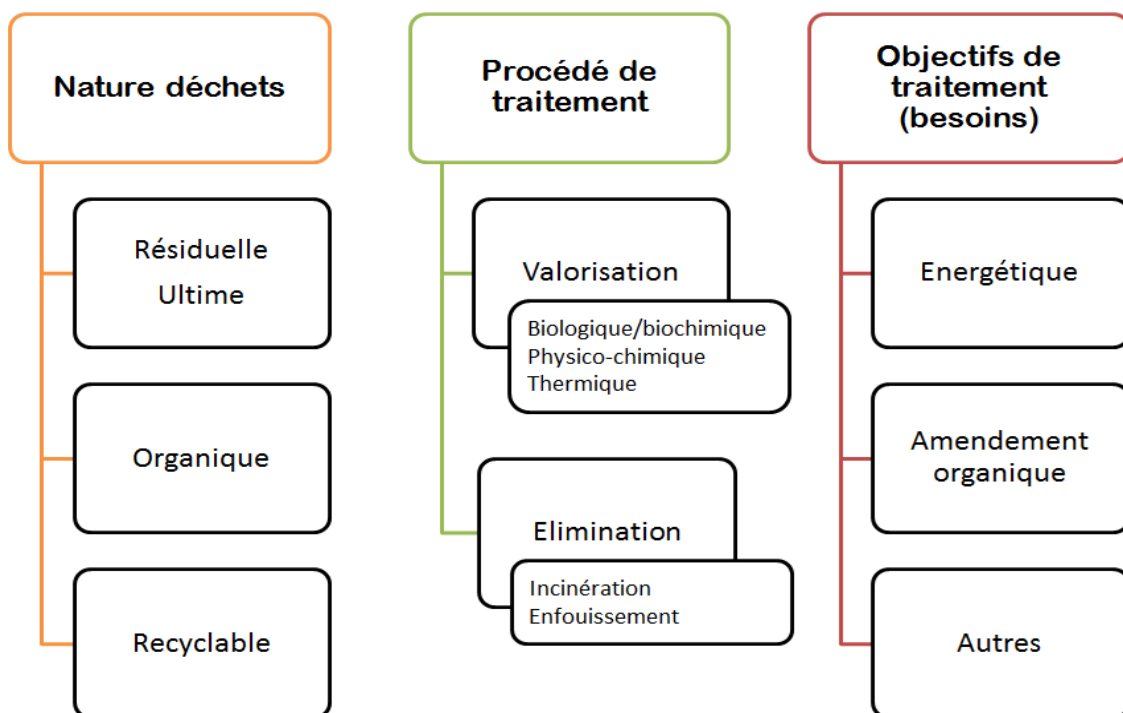


Figure 7 : Principe d'organisation des filières de traitement
(source : HATIK, 2015)

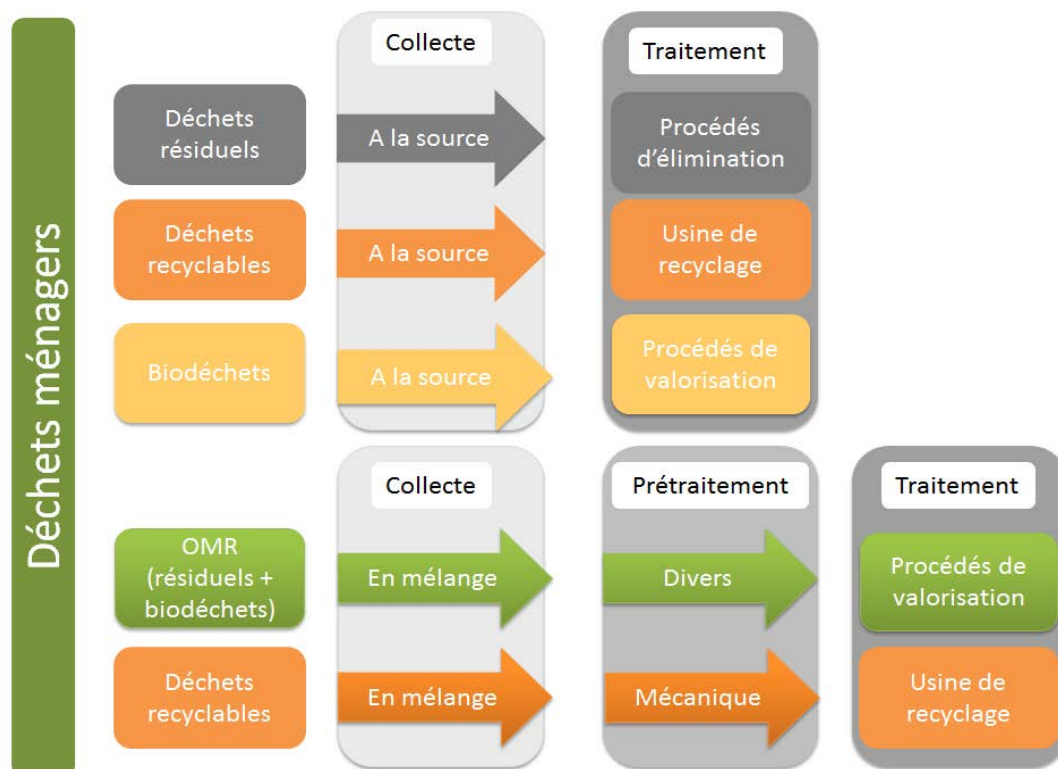


Figure 8 : La gestion générale des déchets ménagers selon le type de collecte
(source : HATIK, 2014)

III. Les modes de gestion des déchets

Au même titre que les typologies de déchets, il existe des typologies pour les modes de gestion. Ces modes de gestion peuvent être ordonnés selon la nature de la transformation ou encore selon les déchets à traiter. Par conséquent, une hiérarchie sous-jacente des modes de gestion peut être observée. Ces modes sont divers et présents à chacune des phases de gestion. Les phases de gestion définies au point II.2 correspondent à l'étape de collecte, de tri ou pré-tri, de traitement (valorisation et d'élimination).

A ce stade, plusieurs notions sont importantes, celle d'étape de gestion et celle de mode de gestion. Ces modes dépendent entièrement de la nature et de la composition des déchets. Ils peuvent être des modes de collecte, des modes de tri et des modes traitement. Afin de mieux cerner la « gestion des déchets », il est important dans un premier de s'intéresser au parcours global que réalise un déchet et dans un deuxième temps de décrire les différents modes de gestion pour chacune des étapes.

III.1 Généralités

Une fois triés et collectés, plusieurs flux de déchets sont discernables. Trois grandes catégories de flux sont généralement identifiées : les déchets recyclables, les déchets résiduels et les déchets organiques. C'est en fonction de ces catégories que vont être définies les voies de traitement. Une voie de traitement ou filière de traitement se définit comme : « *l'ensemble des opérations à mettre en œuvre pour aboutir au résultat souhaité* ». Ces filières sont classées selon trois critères : la nature des déchets, le procédé principal de traitement et l'objectif du traitement. Pour cela, nous avons besoin de ce que nous avons appelé jusque-là des modes de traitement ou des procédés qui correspondent simplement aux outils de traitement. Ces outils sont classés en deux catégories : les outils de valorisation (énergétique et/ou organique) et les outils d'élimination (Figure 7). L'étape d'élimination à l'inverse de la valorisation est présentée comme « *toute opération qui n'est pas de la valorisation même lorsque ladite opération a comme conséquence secondaire la récupération de substances, matières ou produits ou d'énergie* » (art. L. 541-1-1 du code de l'environnement).

Les outils recensés dans ce manuscrit sont :

- Autour de la valorisation : la méthanisation, le compostage, physico-chimique, la gazéification, la pyrolyse et l'usine de recyclage ;
- Autour de l'élimination : l'enfouissement et l'incinération.

Les déchets résiduels ou ultimes vont être éliminés en enfouissement ou incinération ; les déchets organiques sont valorisés (énergie et/ou par retour au sol) et les déchets recyclables sont orientés vers des filières spécifiques de valorisation matière ou de recyclage (Figure 8).

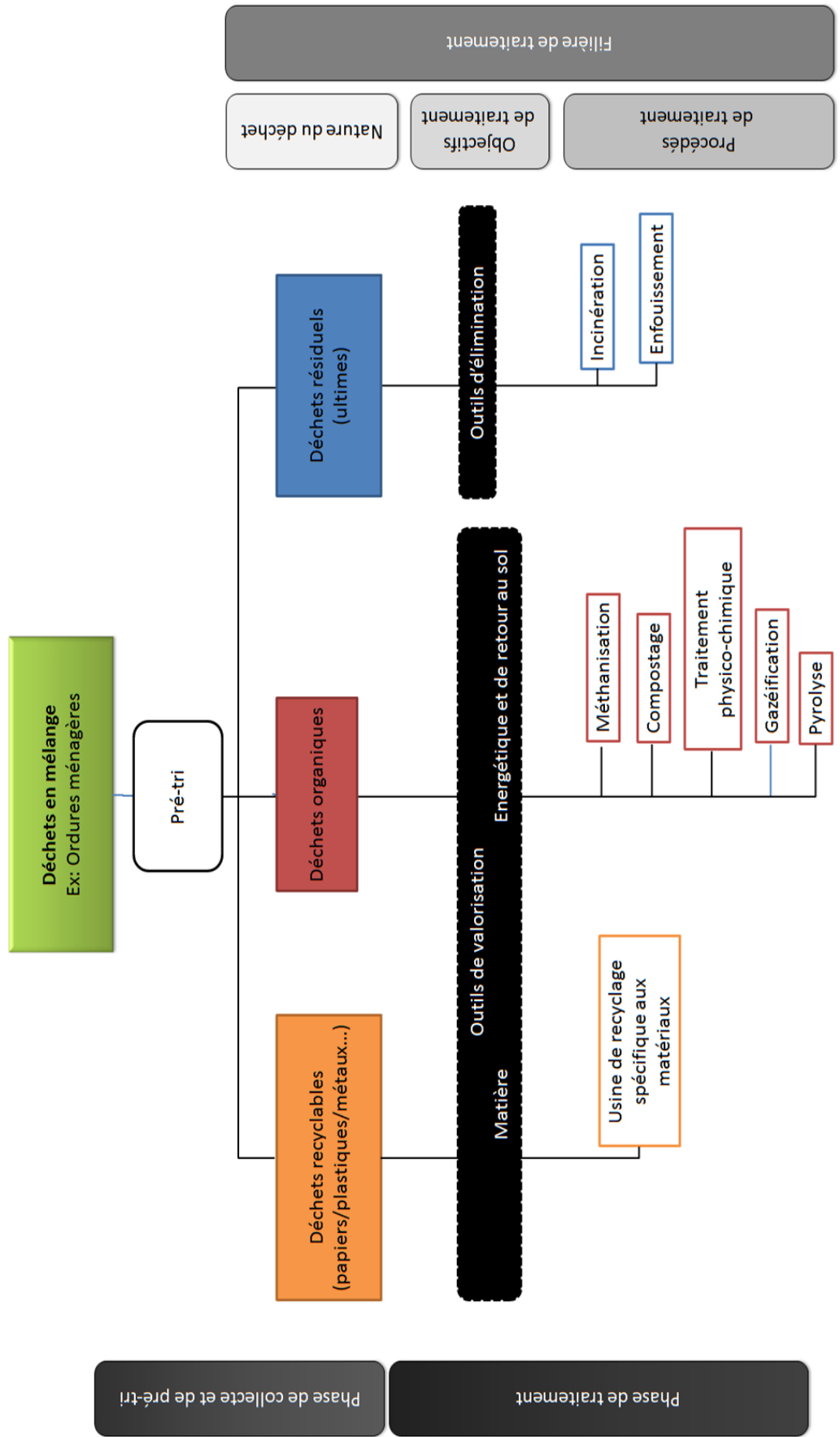


Figure 9 : Organigramme de la gestion générale des déchets

Selon le type de collecte en mélange ou séparée à la source, les biodéchets devront subir des prétraitements ou pré-tris afin d'être valorisés. Ces prétraitements ont pour but d'extraire les parties pouvant être recyclées de celles qui ne le sont pas (résiduelles) des biodéchets. En résumé, si les biodéchets ou les recyclables sont collectés en mélange, une étape intermédiaire de prétraitement est obligatoire afin de séparer les différents flux. Plus les flux sont purs et plus leur valorisation est de bonne qualité.

La Figure 9 résume le déroulement de la gestion des déchets appliquée à l'exemple des ordures ménagères. Afin d'approfondir cette analyse des modes de gestion, nous présentons dans un premier point les modes de collecte qui détermineront la nécessité d'une étape de pré-tri avant l'entrée en filière de valorisation et enfin les filières d'élimination. Nous nous attachons pour chaque procédé étudié à le définir, à décrire son fonctionnement par étapes, à identifier les flux d'entrée et de sortie ainsi que leurs traitements respectifs et enfin de synthétiser les différents paramètres et propriétés techniques le caractérisant. Ces données sont également accompagnées d'exemples d'installations existantes afin de s'inspirer des réalisations actuelles.

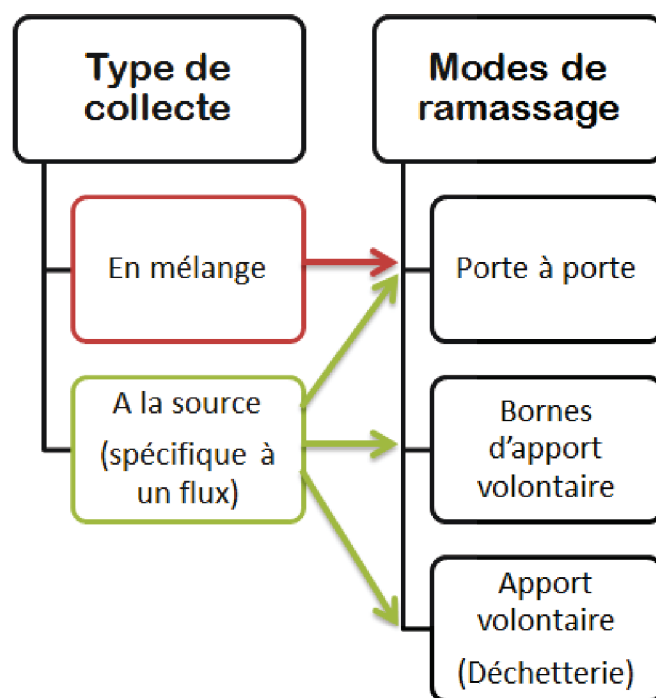


Figure 10 : Principe d'organisation entre les types et les modes de collectes (source : HATIK, 2015)

Systèmes de stockage	Systèmes de stockage complémentaire	Conditionnement
•Poubelles séparées •Poubelles multi-fractions	•Containers souterrains •Système pneumatique	•Sacs en papier •Sacs en plastique biodégradable ou pas et de différentes couleurs dans le cas du tri optique •Broyeur de cuisine

Figure 11 : Systèmes de stockage existants (source : Avfall Sverige, 2013)

III.2 Les modes de collecte

Les modes de collecte établis sont fonction de la nature des déchets et surtout dépendent des modes de traitement existants en aval. En effet, ce sont des moyens techniques de traitement qui déterminent toute la chaîne de gestion et par conséquent les modes de collecte. Ces modes sont donc de deux types selon que le déchet soit collecté en mélange ou à la source, c'est-à-dire séparément des autres déchets.

Lorsque les déchets sont collectés en mélange, le terme utilisé est « la collecte multimatériaux en mélange ». Il définit deux catégories de déchets à trier : les déchets recyclables et les autres. Elle est peu contraignante pour le citoyen, qui doit cependant être en mesure de reconnaître le caractère recyclable d'un déchet. Et la collecte à la source dite la collecte « multimatériaux séparative » définit des catégories de déchets spécifiques comme le verre, le papier, les plastiques, les métaux,... et les autres déchets. Elle demande un effort poussé du citoyen, qui doit s'organiser pour trier ses déchets en distinguant leurs matériaux respectifs.

Les déchets ainsi triés, séparés sont récupérés par les services communaux selon deux modes de ramassages :

- Le ramassage au « porte à porte » (PAP): mise à disposition des citoyens de véhicules passant à jours réguliers afin de ramasser selon le système de collecte de la commune certains types de déchets (poubelles de différentes couleurs...).
- Le ramassage « en apport volontaire » (BAP): mis à disposition des citoyens des contenants (sur les voies publiques, sur des parkings ou dans les déchetteries) où les personnes viennent volontairement y déposer leurs déchets triés. La mise à disposition de déchetterie permet également l'apport par le citoyen de déchets à trier et recycler. Ces sites permettent aux particuliers d'avoir un exutoire pour leurs déchets non collectés en porte à porte, de valoriser un maximum de déchets et ainsi d'éviter les dépôts sauvages (Figure 10).

Il est impératif avant de mettre en place une stratégie de collecte, d'identifier le gisement qualitativement (type et composition des déchets) et quantitativement. Cette caractérisation permet d'éviter les mélanges pouvant se révéler dangereux, d'optimiser les filières de valorisation, d'avoir un mode de collecte adapté aux déchets tout en optimisant les coûts de gestion. Le choix dépend aussi bien des contraintes liées aux types d'habitat, des infrastructures routières, des procédés de traitements qui suivent, du matériel existant, du matériel à mettre en œuvre ainsi que de la fréquence de collecte (respect des principes de proximité et d'autosuffisance). Selon la collecte choisie (multi-matériaux en mélange ou séparée) plusieurs systèmes de stockage sont possibles (Figure 11).

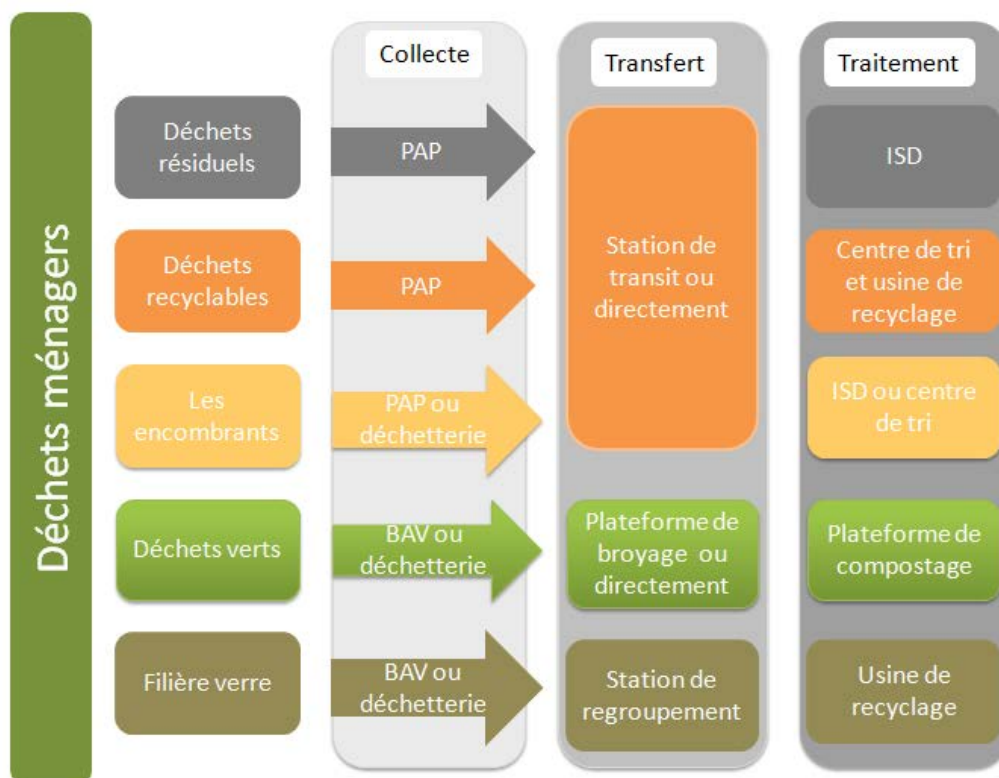


Figure 12 : Récapitulatif des étapes de la gestion des principaux flux de déchets ménagers (source : HATIK, 2014)

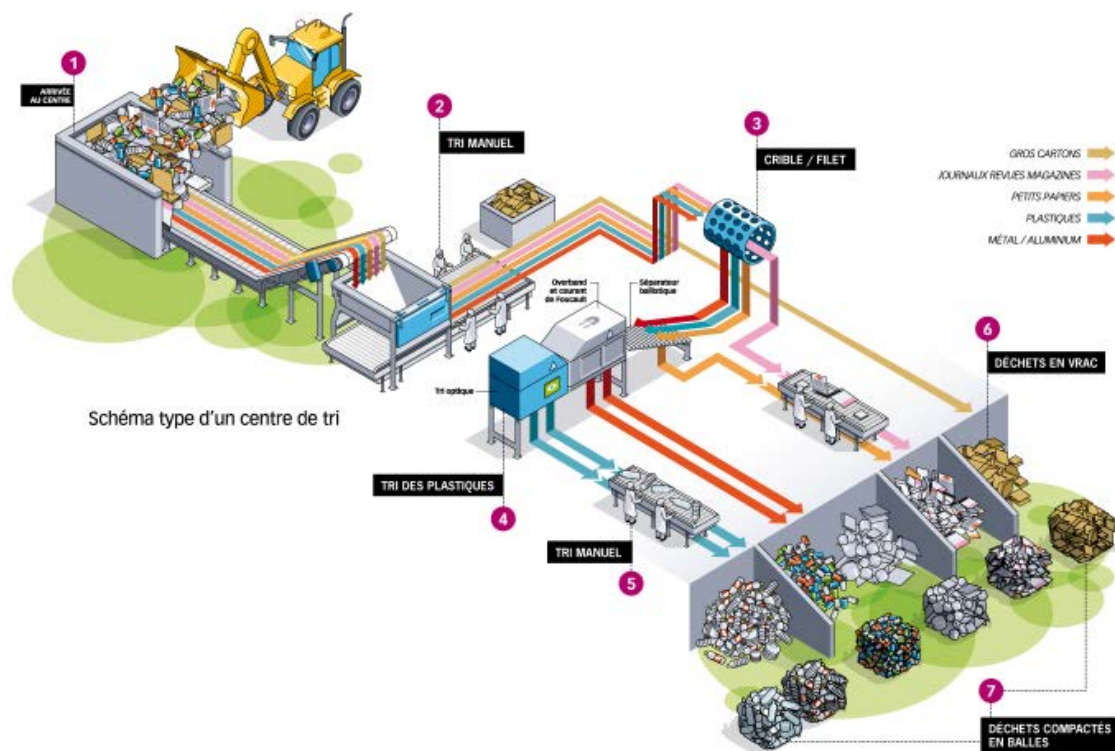


Figure 13 : Schéma type d'un centre de tri (source : star.re, 2014)

A la Réunion, de manière générale, la collecte s'apparente à une collecte de type multimatériaux en mélange : une poubelle pour les déchets recyclables de couleur jaune et une poubelle pour les déchets non recyclables de couleur verte ou grise selon les communes. Le verre étant systématiquement mis à part dans des bornes d'apport volontaire réservées à cet effet. Il faut préciser qu'en plus du manque de standardisation au niveau des couleurs de poubelles, les établissements publics de coopération intercommunale (EPCI) de l'île fonctionnent également de façon différente concernant les déchets soumis au ramassage en PAP ou en BAV⁹ (Figure 12). Afin de détailler et de conceptualiser l'étape de collecte des déchets, plusieurs exemples de gestion issus de la Suède sont présentés en annexe 3 (Avfall Sverige, 2013).

En résumé, les modes de collecte sont au nombre de deux en mélange ou à la source en fonction des déchets et des équipements présents sur le territoire. De ces modes de collecte découlent des modes de ramassages en porte à porte et par apports volontaires ainsi que des modes de stockage via conditionnement (poubelle, containers, bornes, sacs...). Certains mode de stockage nécessitent d'être pensés en amont de la phase de construction (étude des plans pour un nouvel immeuble ou dans l'aménagement d'une rue) comme le système pneumatique, le broyeur de cuisine voir les containers souterrains.

Dans le cas de notre étude, nous nous intéresserons au mode actuel de collecte à la Réunion à savoir multi-matériaux à deux voies (déchets ménagers et recyclables) et également à la collecte multi-matériaux à trois voies (déchets ménagers, recyclables et organiques) imposée par la réglementation (collecte séparée des biodéchets).

III.3 Les modes de tri

Les déchets collectés en mélange nécessitent d'être séparés des autres flux de déchets pour être valorisés. Les modes de tri peuvent s'adapter selon l'objectif du tri. Les objectifs peuvent être orientés pour le tri des recyclables (valorisation matière) ou encore pour le tri des biodéchets (valorisation énergétique et retour au sol). Dans le cas des recyclables, le mode utilisé est dit mécanique et dans le cas des biodéchets on ne parle plus d'opération de tri mais mode de prétraitement ou de pré-tri (Figure 8).

III.3.1 Le mode de tri mécanique

Le mode de tri mécanique consiste à séparer les déchets recyclables de ceux qui ne le sont pas (ultimes). Le tri mécanique s'accompagne de plusieurs étapes spécifiques à un objectif de tri. Par exemple, une chaîne de tri constituée d'over-band ou bande aimantée a pour objectif de capter les déchets métalliques. Chaque chaîne de tri est donc spécifique et unique en fonction des objectifs de tri fixés. Mais de manière générale (Figure 13), un premier tri mécanique est effectué permettant de séparer les corps plats (cartons) des corps creux (bouteilles) ainsi que

⁹ La communauté Européenne s'applique à uniformiser la collecte séparative des déchets en Europe, en commençant par standardiser les couleurs des poubelles et leurs contenus. Finalement, ce projet a été reporté pour cause de complexité.

les métaux. Les déchets sont ensuite dirigés vers différents tapis roulants où est effectué un second tri, cette fois-ci « manuel ». Ce tri s'effectue le long de tapis roulants selon un principe généralement de tri positif. C'est-à-dire que les déchets à valoriser sont retirés manuellement du tapis central afin de ne retrouver en bout de chaîne que les déchets non recyclables. Les déchets recyclables sont alors acheminés spécifiquement vers une valorisation matière au sein d'usine de recyclage tandis que les déchets non recyclables (ultimes) sont éliminés soit par incinération soit par enfouissement.

Le tri mécanique consiste à obtenir des fractions dites « propres ». Les principales techniques d'extraction des indésirables sont le tri granulométrique, tri balistique, tri densimétrique, tri overband, tri aéraulique, tri optique, dilacération, et séparation hydraulique.

Les tris mécaniques permettent donc d'extraire plusieurs fractions comme :

- Les recyclables : papiers, cartons, métaux et verres.
- Les refus à haut PCI (CSR) qui présentent un potentiel combustible inférieur (PCI) compris entre 3 000 à 5 000 kcal/kg, et qui peuvent, sous conditions, faire l'objet d'une valorisation énergétique (Cf. Annexe 4) (FNADE, 2010 ; Nasrullah, 2014),
- Les biodégradable (ou fermentescible), destinés au traitement biologique,
- Et enfin, la fraction dite résiduelle, caractérisée par un faible pouvoir combustible et un faible taux de matière organique, assimilée à un « déchet ultime », et donc destinée à l'enfouissement en ISDND.

Il est important de noter que le tri mécanique des recyclables issus des ménages s'effectue au sein d'un centre de tri. Pour les autres flux (autres que ménagers), le tri mécanique se situe normalement en amont du procédé de traitement. Des exemples de chaîne de tri mécanique sont présentés en annexe 5 (les installations de TMB de Launay-Lantic et de l'usine Améthyste à Montpellier) familièrement appelées tri-mécano biologique.

III.3.2 **Les modes de prétraitement**

Les modes de prétraitements identifiés sont de deux types : hygiénisation et enzymatique. Comme vu précédemment, ces prétraitements sont nécessaires uniquement si les biodéchets ont été collectés en mélange comme c'est le cas avec les ordures ménagères par exemple. Certaines études sur les prétraitements montrent qu'ils peuvent avoir des effets notamment sur la production d'hydrogène (Elbeshbishy, 2011 ; Dong, 2010 ; Pommier, 2010).

III.3.2.1 **Le prétraitement par procédé d'hygiénisation**

Les biodéchets doivent subir en général un prétraitement avant d'être intégrés dans un digesteur. Par exemple lorsqu'il s'agit de déchets à risque sanitaire comme les

sous-produits d'origine animale de catégorie 3, ces derniers doivent être hygiénisés ou « pasteurisé » afin de détruire tous micro-organismes pathogènes (règlement n°1774-2002). De ce fait, l'étape d'hygiénisation consiste à brasser les déchets à une température de 70°C pendant une heure. Souvent cette étape est suivie d'une étape d'affinage (broyage de la matière). Des exemples sont présentés en annexe 6. (Sysav, 2012)

III.3.2.2 *Le prétraitement par voie enzymatique*

Le mode de prétraitement enzymatique présenté ici permet de transformer environ 95% des biodéchets en mélange en un bio-liquide. Les biodéchets sont alors séparés des autres déchets solides par l'action enzymatique favorisant la liquéfaction des matières organiques. Ce bio-liquide peut ensuite être valorisé pour la production de biogaz mais également pour la production de bioéthanol de seconde génération ou autre comme le butanol (DONG energy.de, 2013). Les inorganiques comme le verre, le PVC, les métaux, les plastiques, les textiles... sont alors triés mécaniquement pour être acheminés vers une filière de recyclage. D'autres matériaux comme les plastiques et les textiles peuvent être utilisés comme carburant dans la production d'énergie dû à des PCI élevés (CSR) (Figure 14).

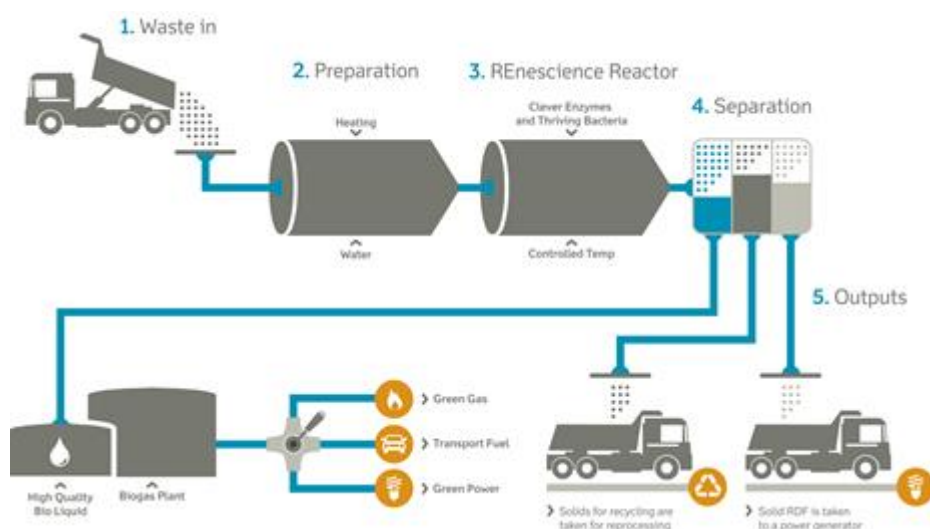


Figure 14 : Présentation d'un mode de prétraitement par voie enzymatique (source : dongenergy.com, 2013)

Les biodéchets lorsqu'ils sont collectés en mélange doivent obligatoirement être séparés des autres déchets pour être valorisés. Les procédés de prétraitement présentés ici utilisent des méthodes très distinctes les unes des autres. Le choix entre ces différents procédés dépend des modes de valorisation présents sur le territoire ou des projets à venir mais également et surtout des objectifs de tri (recyclables ou/et biodéchets). Il est important de visualiser que chacune des étapes de gestion et des modes constituant chacune des phases sont interconnectés les unes avec les autres. Et que cette connexion entre étapes et entre modes vont en bout de filières de traitement constituer des scénarios de gestion. C'est en cela, que nous nous attachons à décrire et à observer précisément les entrants et les sortants

mais également les modes permettant le passage de l'un à l'autre et de répondre aux objectifs de départ.

Les modes de collecte et de tri ont été respectivement présentés selon une lecture linéaire de la phase de gestion. A ce stade, nous considérons pour la partie applicative, le mode de collecte multi-matériaux en mélange à deux et trois flux principalement selon un mode de ramassage en porte-à-porte et tous types de pré-tri (mécanique et prétraitement). Le paragraphe suivant présente par conséquent l'étape suivante de gestion au travers des modes de traitement.

III.4 Les modes de traitement

Les modes de traitement comme précisés précédemment sont classés selon deux types : les modes de valorisation et les modes d'élimination. Chacun de ces modes répondent à des natures de déchets différentes (valorisables ou ultimes) et donc à des objectifs de traitement différents.

Dans le premier cas des déchets valorisables, l'objectif est d'extraire de ces déchets soit un potentiel énergétique, soit un retour dans le cas des biodéchets ou encore un potentiel dit de matière dans le cas des déchets recyclables.

Dans le second cas des déchets ultimes ou résiduels, l'objectif est de les sortir de la chaîne de gestion en les éliminant. Au sein de ces modes de traitement sont présents ce que l'on appelle des systèmes de traitement ou encore des procédés de traitement.

Ces procédés de traitement sont le cœur du processus de transformation des déchets. En effet, nous avons pu constater lors des étapes de gestion précédentes que les déchets étaient peu ou pas transformés dans leurs caractéristiques physiques. Ce point s'attache donc à présenter les modes de traitement au travers des procédés selon une typologie des processus de transformation à savoir, les procédés thermiques, les procédés biologiques, biochimiques et physico-chimiques (Figure 15).

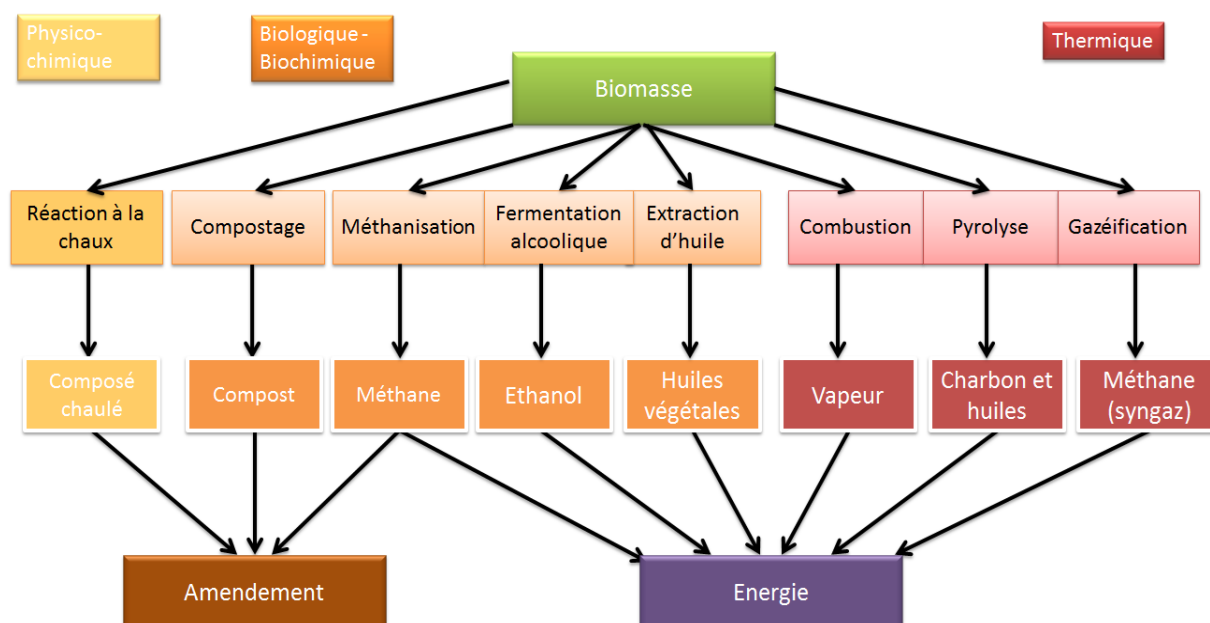


Figure 15 : Les modes de valorisation des biodéchets (source : HATIK, 2014)

III.4.1 Les procédés thermiques

Les procédés thermiques identifiés sont au nombre de trois : l'incinération, la gazéification et la pyrolyse. L'incinération est un mode d'élimination utilisé pour le traitement des déchets ultimes tandis que la gazéification et la pyrolyse sont des procédés permettant le traitement de déchets valorisables (recyclables et biodéchets). Au sens de la réglementation, une diminution de l'utilisation des modes d'élimination est imposée. Il est important de garder cette notion en mémoire car elle conditionnera les propositions finales de scénarios de gestion.

Pour chacun de ces procédés, une description physique et technique est présentée afin d'avoir un aperçu du fonctionnement et de la structure du procédé ainsi que des paramètres entrant et sortant sous forme de fiche synthétique.

III.4.1.1 La pyrolyse

Principe de pyrolyse : La pyrolyse est une réaction chimique permettant la décomposition d'un corps organique par l'action de la chaleur (entre 400 et 800°C) (sans flamme, ni combustion). Elle consiste à chauffer un matériau sous atmosphère contrôlée (atmosphère pauvre ou dépourvue d'oxygène) ne permettant pas d'initier une flamme de combustion. Ainsi, le matériau est fragmenté en substances qui peuvent servir de combustibles. En effet, tous les corps organiques complexes sont composés de chaînes de molécules (polymère ; par exemple plastiques, caoutchouc, bois, papier, etc.). La chaleur permet de casser cette chaîne et de produire des molécules organiques plus petites, par exemple, des molécules de méthane.

La pyrolyse possède un rendement allant de 65% à 80% avec un potentiel énergétique de 400 à 800 kWh/tonne de déchets auquel il faut soustraire la consommation interne au procédé (environ 90%). Cette production peut donc être considérée comme négligeable (mamunicipaliteefficace.ca, 2015)

Schéma du procédé :



(Source : biogreen.fr)

Entrant : Tous types de déchets en flux propres (OM, bois, plastiques, pneus, organiques...)	Sortant : hydrocarbures solides (charbon de bois ou biochar), liquides (huile de pyrolyse) ou gazeux (hydrogène, méthane, oxyde de carbone...)
Objectifs de traitement :	Valorisation énergétique via production de carburants par l'intermédiaire des huiles pyrroliques ou production d'autres composés chimiques comme les phénols, via production de combustibles (méthane...) ou encore retour au sol des cendres et composés charbonneux.
Techniques :	La proportion des différents produits dépend de la matière première mais surtout des conditions de pyrolyse. En effet, une pyrolyse longue (plusieurs heures à plusieurs jours selon le volume de bois ou déchets végétaux et selon le matériel utilisé), à température modérée (400°C), dite aussi « carbonation » produit beaucoup de charbon de bois. Tandis que la technique séculaire, récemment améliorée pour ses développements industriels (pyrolyse plus rapide : quelques minutes à quelques secondes) à des températures variant entre 500°C et 800 °C produit moins de charbon et plus de vapeur.

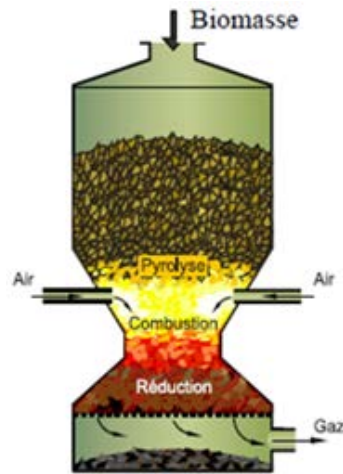
III.4.1.2 La gazéification

Principe : La gazéification désigne une transformation thermochimique consistant à décomposer par la chaleur le déchet en présence d'un réactif gazeux (gaz carbonique, vapeur d'eau puis oxygène/air) dans le but d'obtenir un gaz combustible : le syngaz (monoxyde de carbone (CO) et d'hydrogène (H₂)). Autrement dit, elle permet de convertir des matières carbonées en un gaz de synthèse via un agent limitant de gazéification (air, oxygène ou vapeur).

La gazéification possède un rendement net en conversion électrique par moteurs thermiques de 29,5%. Ce rendement peut passer à 32% par utilisation de turbines à gaz. En termes d'investissement, ce procédé correspond à un montant de 0,8 M€/

MWth des déchets entrant (Antonini, .2010).

Schéma du procédé :



(Source : Xylowatt (exemple de réacteur à co-courant))

Entrant : Tous types de déchets en flux propres (OM, bois, plastiques, pneus, organiques...)

Sortant : Le syngaz composé d'environ 45% d'azote, de 20% de monoxyde de carbone, de 20% d'hydrogène, de 10% de dioxyde de carbone et de 5% de méthane (mamunicipaliteefficace.ca, 2014). Et de cendres.

Objectifs de traitement :

Valorisation énergétique du syngaz permet la production électricité ou de carburant de deuxième génération ou encore l'alimentation de pile à combustibles après extraction de l'hydrogène contenu et une valorisation organique par retour au sol des cendres selon les entrants.

Techniques :

Il existe à l'heure actuelle une quarantaine de procédés de gazéification opérationnels ou au stade de recherche regroupé en 4 familles: la gazéification en lit fixe (à contre-courant et à co-courant); la gazéification en lit fluidisé (circulant, dense et double), la gazéification en lit entraîné, et la gazéification à étages. Le choix d'une de ces technologies dépend de plusieurs paramètres comme le type de flux entrant, la taille de l'installation, le mode d'alimentation du réacteur (combustible et comburant), l'aboutissement de la technologie... (Houcine, 2009)

Références

Ahmed, 2010 ; Arena, 2012 ; Brunhn, 2011; Byun, 2011 ; Sulc, 2012; Tanigaki, 2012; Umberto, 2012; Xiao, 2010 ; Wu, 2010 ; Zhang, 2012 ; Gómez-Barea, 2009 ; Guan, 2009 ; He, 2009; Joseph, 2012; Kantarelis, 2009, Koukouzas, 2008 ; Langerman, 1991 ; Min, 2011 ; Nasr, 2011 ; Nipattummakul, 2012 ; Perez, 2012, Pérez, 2012 ; Schieder, 2000.

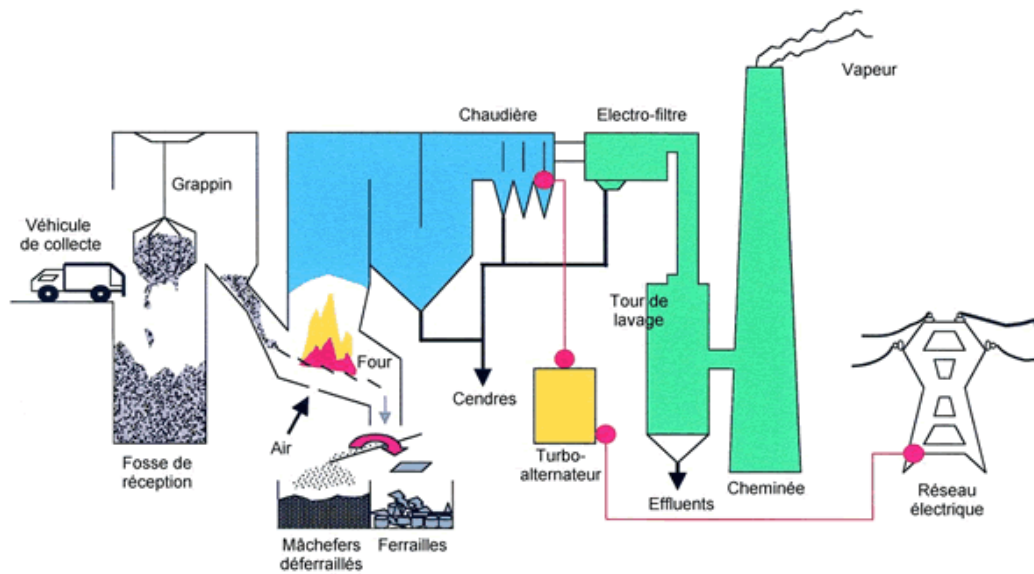
Des exemples d'unité de gazéification sont présentés en annexe 7.

III.4.1.3 Le procédé d'incinération

Principe : Méthode de traitement thermique des déchets qui consiste en une combustion (technologie et température variant selon la nature du déchet) avec excès d'air et un traitement des fumées. Les déchets sont brûlés dans des fours de tailles industrielles à une température généralement voisine de 800 à 1200°C.

L'incinérateur à un rendement thermique de l'ordre de 80% et un potentiel de production électrique de 400 à 700 kWh/t de déchets dont 50% est utilisé en autoconsommation pour un procédé disposant d'un système de cogénération (waste control et mamunicipalite.ca, 2014). Le coût d'investissement d'un tel projet s'élève à environ 1,48 M€/ MWth des déchets entrants (Antonini, 2010).

Schéma du procédé :



(Source : Le Goux, 1995)

Entrant : Tous types de déchets en mélange (OM, bois, plastiques, pneus, organiques...)

Sortant : Vapeur, mâchefers, fumées, REFIOM, gâteaux de boues

Objectifs de traitement :

Principalement l'élimination des déchets autrement leur transformation en d'autres matières moins volumineuses mais toujours nécessitées de traitement final.

Deuxièmement la valorisation énergétique de la vapeur en électricité ou en chaleur

<u>Techniques :</u>	Lors de l'incinération, la combustion des déchets est autoalimentée, c'est-à-dire qu'aucun autre combustible n'est nécessaire au maintien de la combustion. Seul un brûleur est nécessaire pour monter en température jusqu'aux conditions d'incinération (850°C pendant au moins 2 secondes après la dernière injection d'air) et notamment l'arrêt du four et descente en température. Unité d'Incinération d'Ordures Ménagères (UIOM) comprend au minimum un four (lieu de la combustion du déchet), une chaudière (récupération d'énergie) et un traitement des fumées (captation des polluants avant rejet à l'atmosphère) De manières générales, les fours utilisés sont de types à <u>grille</u> ou <u>tournant</u>. Dans le four à grille, les déchets sont brûlés pendant une durée de deux à trois heures à une température de 750° à 1000°. On utilise une grille pour permettre le passage de l'air à travers la couche en ignition. Les technologies diffèrent selon la grille (grille fixe ou mobile), le mélange des déchets et de l'air pour parvenir à une meilleure combustion (injection latérale d'air...), et, par conséquent, la production d'imbrûlés et de cendres.
<u>Référence :</u>	Boesch, 2014 ;Perkoulidis, 2010 ; Sabbas, 2003 ; Tan, 2015.

Compléments d'informations sur le procédé d'incinération et sur les sortants :

Les installations d'incinération est le terme couramment utilisé pour décrire les incinérateurs appliqués aux traitements des déchets. Ce terme se définit comme suit : "*tout équipement ou unité technique, fixe ou mobile, affecté au traitement thermique de déchets, avec ou sans récupération de la chaleur produite par la combustion. (...)La présente définition couvre le site et l'ensemble constitué par les installations d'incinération, de réception, de stockage et de traitement préalable des déchets sur le site même; ses systèmes d'alimentation en déchets, en combustible et en air ; la chaudière ; les installations de traitement ou de stockage des résidus, des gaz de combustion et des eaux usées ; la cheminée ; les appareils et dispositifs de commande des opérations d'incinération et les systèmes d'enregistrement et de surveillance des conditions d'incinération "* (Sénat rapport n°415, 1998).

Les résidus d'incinération sont nombreux. En effet, l'incinération est un mode d'élimination des déchets mais ne fait pas *disparaître* les déchets, elle les transforme en :

- mâchefers (tout ce qui ne brûle pas) : environs 30 % du poids des déchets. Ils peuvent normalement être utilisés comme matériaux de construction ou de terrassement (sujet en conversation);
- cendres et REFIOM (résidus d'épuration des fumées d'incinération d'ordures ménagères) : environ 3 % du poids des déchets. Leur toxicité

dépend du traitement des fumées choisi. Celle-ci est mesurée permettant de déterminer dans quelle classe de décharge seront dirigées les cendres.

Et des fumées.

Les cendres sont déferrallées et sont utilisées comme remblai routier ou stockés en ISDND. Les cendres volantes sont récupérées puis stabilisées dans une base de béton et enterrées en ISDD.

Les mâchefers issus de l'incinération des ordures ménagères (MIOM) sont des scories solides. Ils se présentent sous la forme de granules de couleur grise, mélange de métaux, de verre, de silice, d'alumine, de calcaire, de chaux, d'imbrûlés et d'eau. Les mâchefers peuvent être soit stockés dans des ISDI, soit être retraités en vue d'une valorisation matière (après extraction des métaux). Cette valorisation matière consiste à utiliser les mâchefers comme matériau en technique routière. Les principales utilisations concernent : les remblais, les sous-couches de voirie, et la chaussée.

Les REFIOM sont récupérés lors des différentes phases d'épuration des fumées. Ils sont constitués d'une part de substances minérales inertes (silice, calcaire) (jusqu'à 90 %) et d'autre part de métaux, notamment de métaux lourds. Ils concentrent ainsi les polluants contenus dans les déchets incinérés, à savoir les métaux lourds volatiles, ainsi que le chlore, les dioxines et les furanes. Compte tenu de leurs caractéristiques polluantes, notamment de leur forte teneur en métaux lourds aisément entraînés dans les lixiviats, les REFIOM sont soit enfouis car assimilés à des déchets ultimes, soit vitrifiés (fusion des cendres à haute température). Ce procédé vise l'objectif " zéro déchet ". Plusieurs procédés sont en cours d'expérimentation, dont le principal est la vitrification par torche à plasma.

Et enfin la valorisation énergétique peut être orientée vers une valorisation thermique et/ou une valorisation électrique. La vapeur issue du refroidissement des gaz formés lors de la combustion, est condensée puis passe dans une turbine et un alternateur qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique. Le choix entre les deux formules, ou parfois les deux formules combinées (cogénération), dépend avant tout des conditions locales.

Les procédés thermiques étant présentés, nous nous attachons à exposer les procédés biologiques et biochimiques considérés.

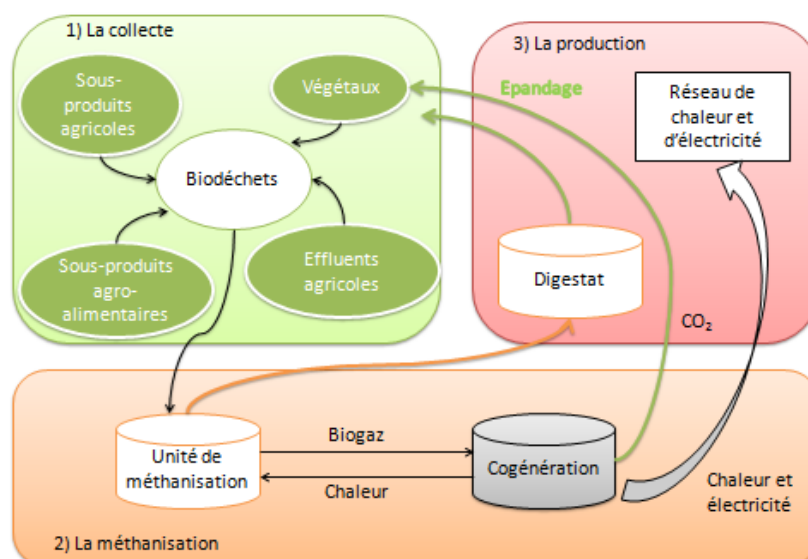
III.4.2 **Les procédés biologiques et biochimiques**

Les procédés biologiques et biochimiques répertoriés sont au nombre de trois : la méthanisation, le compostage et le procédé d'enfouissement. Les procédés de méthanisation et de compostage sont utilisés pour le traitement des déchets organiques tandis que le procédé d'enfouissement pour le traitement des déchets ultimes.

III.4.2.1 Le procédé de méthanisation

Principe : La méthanisation est un processus naturel biologique de fermentation permettant la dégradation de la matière organique par l'interaction de plusieurs microorganismes en absence d'oxygène (anaérobie). De nos jours, la méthanisation est utilisée en tant que bioprocédé. Elle constitue un outil permettant de dépolluer des rejets chargés en matières organiques.

Schéma du procédé : Schéma récapitulatif des coproduits de la méthanisation



(source : HATIK, 2014)

Entrant : Tous types de déchets organiques (les déjections animales, les déchets de l'industrie agro-alimentaires, fraction organiques des ordures ménagères, les déchets agricoles, les eaux usées et les boues de stations d'épuration) exceptés les déchets ligneux

Sortant : Biogaz (méthane à 60%, de dioxyde de carbone à 40%), digestat

Objectifs de traitement :

Valorisation énergétique du biogaz par production de chaleur ou d'électricité dans un processus de cogénération, ou encore de carburant ou de gaz naturel après traitement (affinage ou épuration du

	biogaz). Ordre de grandeur : un mètre cube de méthane correspond à l'équivalent de 1,15 litre d'essence, 1,7 litre d'alcool à brûler mais surtout de 9,7 kW/h d'électricité et de 0,94m³ de gaz naturel.
<u>Techniques :</u>	La dégradation des déchets s'effectue au sein d'un digesteur dans lequel la matière organique est dégradée par un processus de fermentation anaérobie à l'aide de micro-organismes dans une atmosphère à température contrôlée. Ces températures peuvent être de trois ordres de grandeurs correspondant chacune à des techniques différentes : psychrophile (5 à 15°C), mésophile (15 à 45°C), thermophile (45°C à 65°C). Les techniques mésophile et thermophile sont les plus utilisées dans le traitement des déchets. Il existe également des technologies de digesteurs spécifiques à la nature des déchets. Si les déchets solides, on préférera les processus de méthanisation dite sèche à l'inverse pour un déchet liquide naturellement riche en eau, on préférera un processus de méthanisation dite humide. Le choix d'une technique prend donc principalement en compte la nature du déchet et la température d'exécution de la technique. En plus, un certain nombre de paramètres physico-chimiques sont à considérer comme le pH, la composition des déchets et les caractéristiques d'oxydoréduction. Il est également important de définir les objectifs énergétiques visés, à savoir la production d'électricité, de froid, de chaleur ou encore de biocarburant qui nécessitent individuellement des procédés d'affinage, d'épuration ou de transformations spécifiques.
<u>Références</u>	Banks, 2011 ; Barret, 2010 ; Behera, 2010 ; Bouallagui, 2005 ; Carlson, 2012, Cecchi, 2011; Chamy, 2011; Chynoweth, 2001 ; Chynoweth, 1993 ; Fdez-Güelfo, 2011; Lay, 2003 ; Mata-Alvarez, 1996 ; Ponsá, 2011 ; Qiao, 2011 ; Rao, 2004 ; Raposo, 2001 ; Tambone, 2010 ;

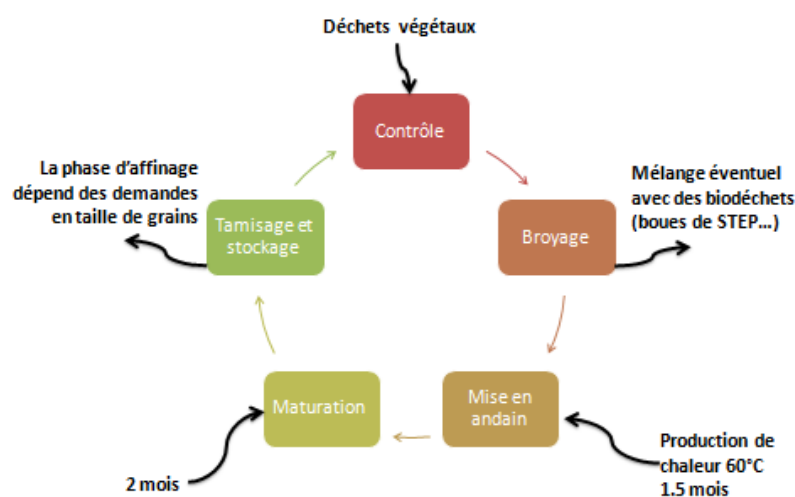
Des exemples d'unités de méthanisation sont présentés en annexe 8 selon différents objectifs de valorisation énergétiques.

III.4.2.2 Le procédé de compostage

Principe : Le compostage est un processus utilisant l'action de divers organismes aérobies pour décomposer sous contrôle (aération, température, humidité), et de façon accélérée, les matières putrescibles. Cela, en vue d'obtenir un amendement organique riche en humus: le compost doit être stable d'un point de vue biologique et exempt d'organismes pathogènes grâce à la chaleur dégagée par le processus (environ 60°C).

Il existe plusieurs techniques de compostages à savoir en système ouvert comme le compostage en en andain (retournés, statiques aérés ou aérés passivement), et en système fermé avec le compostage en silo, en casier et en lits rectangulaires (Albrecht, 2007). A la Réunion, le procédé en andain retournés est l'unique procédé existant et par conséquent explicité ci-dessous.

Schéma du procédé : Cycle général de la fabrication de compost



(source : HATIK, 2014)

Entrant : Tous types de déchets organiques mais principalement les déchets verts et les boues

Sortant : Compost et refus d'affinage

La qualité du compost dépend de la nature et de la qualité des déchets entrants. L'ADEME a commandité une étude sur la comparaison des plateformes de compostages des déchets verts en France métropolitaine afin d'établir une moyenne concernant la composition des composts (ADEME, 2008).

Concernant les composts issus des déchets ménagers une norme spécifique a été établie en 2009 afin de garantir une qualité agronomique et sécuritaire vis à vis de l'environnement. Il s'agit de la norme NFU 44-051.

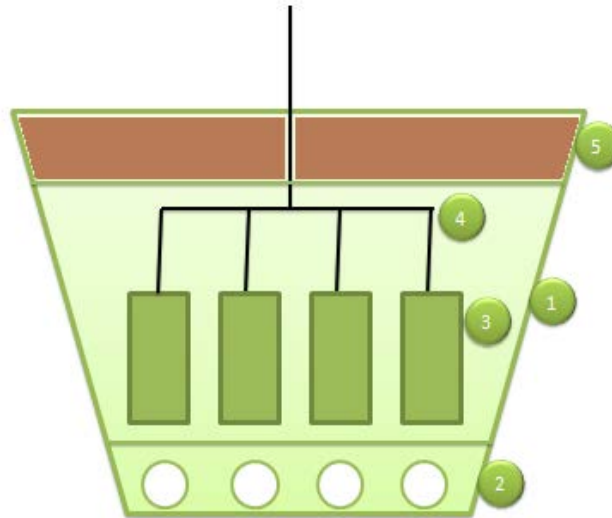
<u>Objectifs de traitement :</u>	Valorisation organique du compost en amendement sur les cultures
<u>Techniques :</u>	Ils sont dans un premier temps broyés et débarrassés autant que possible de leurs emballages. Les déchets sont ensuite mis en andain (tas en extérieurs) ou dans des casiers avec atmosphère contrôlée pendant 1 mois et demi. Durant cette période, les déchets commencent à être transformés en compost sous l'action des micro-organismes. Ces micro-organismes vont dégager de la chaleur augmentant la température des andains à environ 60 à 70°C. Cette montée en température permet incidemment d'hygiéniser le compost. Pendant cette phase, le compost doit être arrosé pour garantir un taux humidité optimum mais aussi pour maintenir une température moyenne (70°C) et éviter les départs de feu. Un mois et demi plus tard, les andains sont déplacés pour passer en phase de maturation pendant 2 mois. Ils sont alors retournés régulièrement et criblés (tamisés) afin de récupérer un compost plus ou moins fin, exempt d'indésirables. Et pour finir, il est stocké pendant 3 mois minimum pour être affiné, avant d'être mis en vente. Chaque lot de compost est bien sûr analysé avant afin de garantir sa qualité et son intérêt agronomique.
<u>Référence :</u>	Baptista, 2010 ; Bernai, 1998 ; Cadena, 2009, De Guardia, 2010 ; Fagnano, 2011.

III.4.2.3 Le procédé d'enfouissement

Principe : L'installation de stockage des déchets (ISD) est une structure permettant le stockage et donc l'enfouissement des déchets ultimes. Il existe trois types d'installation de stockage différents selon la nature physique du déchet :

- 1) ISDD : *Installation de Stockage des Déchets Dangereux* : destiné à accueillir les déchets dangereux. Le déversement dans ces centres est précédé d'analyse des déchets à déverser (arrêté du 30/12/02 relatif au stockage de déchets dangereux),
- 2) ISDND : *Installation de Stockage de Déchets Non Dangereux* (selon la dernière modification de l'arrêté ministériel du 9 septembre 1997 modifié le 19 janvier 2006). reçoit les ordures ménagères et déchets assimilés,
- 3) ISDI : *Installation de stockage des déchets inertes* reçoit les déchets inertes : terres, gravats, béton concassé, etc (arrêté du 28 octobre 2010 relatif au stockage de déchets inertes).

Schéma du procédé : Schéma présentant la structure d'un ISD



(Source : HATIK, 2014)

Entrant : Déchets ultimes

Sortant : Le biogaz produit contient du méthane (CH₄) : 55 ± 5 % (optimum de la production) ; dioxyde de carbone (CO₂) : 45 ± 5 % (optimum de la production) ; hydrogène (H₂) : 1 à 3 % (début de la méthanogenèse) ; azote (N₂) et oxygène (O₂) : quelques %, suivant les conditions du milieu (ISSeP, 2010).

Les lixiviats dits jeunes sont principalement composés d'acide gras volatil (AGV à hauteur de 70% du COT) avec un rapport DBO₅/DCO d'environ 0,5 et de métaux (2g/L) pour un pH inférieur à 6.5. Au cours de leur maturation, ils deviendront basique (pH>7.5) au fur et à mesure de leur dégradation (Amokrane, 1994).

Objectifs de traitement :

Ici, il n'existe pas d'objectifs de traitement à proprement parlé si ce n'est le stockage des déchets ultimes. Les procédés d'élimination ont pour seul objectif de « masquer » les déchets indésirables et de réduire au maximum leur impact sur l'environnement d'où la considération du biogaz et des lixiviats (facteurs très polluants).

Le biogaz récupéré est selon les besoins électrique du moment injecter dans le réseau et dans le cas contraire le biogaz est brûlé par torchère. Les ISD ne sont pas équipés du moins à la Réunion de procédés de stockage du biogaz pour une utilisation ultérieure. Leur valorisation doit donc être immédiate.

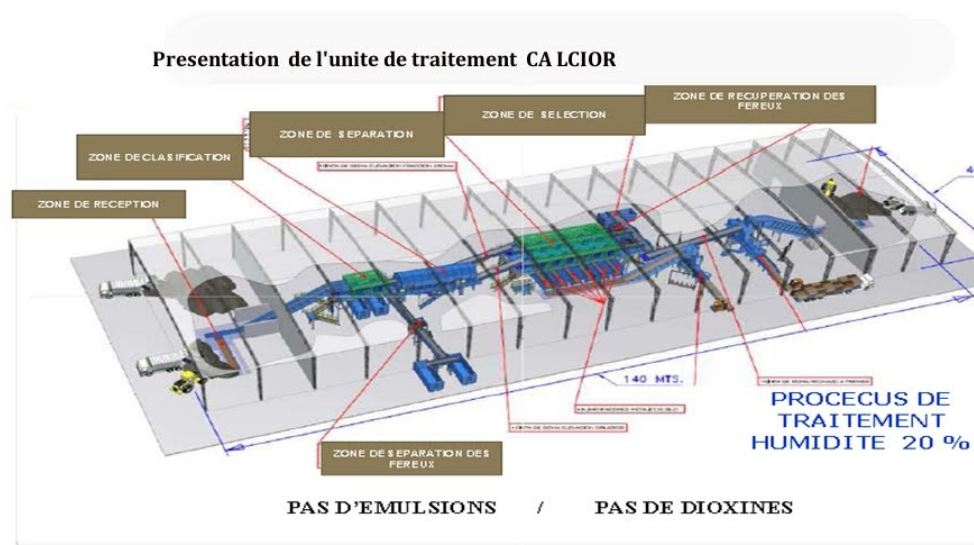
	Les lixiviats sont épurés via différentes techniques dans un objectif de les rejeter sur le site de production pour l'entretien des espaces verts par exemple. La réglementation interdit la sortie des lixiviats même après traitement du site.
<u>Techniques :</u>	Les installations de stockage (ISD) modernes et conformes sont généralement composées d'un ensemble de casiers creusés dans le sol (volumes délimités par une digue stable et étanche) dont la géométrie permet d'éviter les débordements d'un casier à un autre (schéma ci-contre). Un casier peut contenir plusieurs alvéoles (casiers à l'intérieur du casier) (point 3) dans lesquelles sont stockés les déchets. Le fond et les flancs de chaque casier sont étanchés par du sable, de la bentonite ou de l'argile et une géomembrane (mélange de fibres textiles) (point 1) surmontée d'un drainage des lixiviats (liquide résiduels provenant de la percolation de l'eau à travers les déchets) (point 2) afin d'éviter toute pollution du milieu naturel par infiltration et pour garantir une parfaite réhabilitation du site après son exploitation. A titre d'exemple, 1 goutte d'eau prendrait 30 ans pour traverser 60 cm de cette couche d'étanchéité. Pour limiter l'action de l'eau sur les déchets, des fossés détournent les eaux pluviales. Les casiers, une fois pleins, sont recouverts par un matériau étanche (point 5) et également d'un système de captage du biogaz (point 4).
<u>Référence :</u>	Cho, 2012 ; Davidsson, 2007 ; Lay, 1998 ; Lee, 2009; Lo, 2010; Talyan, 2007;

A la Réunion, les installations de biogaz ont des capacités de 1,6 MW et de 1 MW respectivement pour Sainte-Suzanne et Pierrefonds (PPDGDND, 2014). La durée d'exploitation d'un site est d'environ une vingtaine d'années ; pour toute partie couverte, un plan de réhabilitation doit être prévu pour une période d'au moins 30 ans après la fermeture du site.

III.4.3 **Le procédé physico-chimique**

Principe : Le procédé consiste à incorporer aux déchets préalablement triés et broyés, des boues et graisses de stations d'épuration ainsi que, par une adjonction mécanique, un mélange d'oxyde, d'hydroxyde de calcium et d'un adjuvant réactif liquide, permettant d'opérer sur les déchets une déshydratation et un blocage des métaux lourds ainsi que qu'un traitement des ammoniacales. Ce mélange crée une réaction physico-chimique, exothermique naturelle, pouvant atteindre 250 à 300° C, sans lumière et sans oxygène et ce, en 20 minutes qui abouti à la production d'un composé chaulé (Molia, 2008).

Schéma du procédé :



(Source : Molia, 2008)

Entrant : Ordures ménagères, boues et graisses d'épuration

Sortant : composé calcique (mélange d'oxyde, d'hydroxyde de calcium et un adjuvant réactif liquide à base de chaux (calcaire))

Objectifs de traitement :

Valorisation organique du composé en remblais routier « antigel » (sous-couche), et comme matériaux de construction ou tout produit moulé avec du ciment ou béton (pavé autobloquants, dalles, cloisons, écrans anti-bruit, glissières autoroutières...) pour son pouvoir isolant phonique et thermique optimale ou stabilisant en ISD ou en cimenteries comme combustible sous forme de poudre fine. Une 1,5 tonne de composés chaulés équivaut à 1 tonne de charbon du fait de son PCI élevé de l'ordre de 3500. Sa combustion en cimenterie produit 20% de cendres dites « propres » pouvant être incorporés dans le ciment permettant ainsi 20% d'économies en matière première ou encore comme amendement organo-calcique et antiacide qui stabilise le pH des sols.

	Le matériau chaulé entre dans la norme européenne NFU 42001. Il est composé de plus de 3% d'azote, de potassium et de phosphore avec un taux de métaux lourds de 130ppm (norme européenne de 4 000ppm)
<u>Techniques :</u>	Mélange des déchets qui au contact d'un mélange d'oxyde, d'hydroxyde de calcium et un adjuvant réactif liquide à base de chaux (calcaire) produisent un composé calcique par réaction contrôlée « minéralisation cristallisante ». Cette réaction emprisonne les déchets en inhibant toutes pollutions liquides et émissions gazeuses par déshydratation, par modification moléculaire et encapsulage des métaux lourds (ammoniaque). La minéralisation cristallisante est une réaction exothermique pouvant atteindre les 300°C, en absence de lumière et d'oxygène et ce en 20 minute. Après un second broyage et une seconde granulométrie, l'on obtient au bout de 4 heures un produit solide, hydrophobe et inerte. Cet élément est composé principalement de 36% de matières organiques et 64% de matières minérales. Ce procédé permet une réduction en volume et poids initial de respectivement 50% et 25%. (Dezier, 2001)

III.5 Organisation et structuration de la gestion des déchets

Le point précédemment exposé a permis de présenter globalement le chemin parcouru par un déchet au travers des différentes phases de gestion identifiées. Ces phases sont composées elles même de modes ayant chacun des objectifs différents selon la nature des déchets. Par l'observation de cette chaîne de gestion, nous avons souhaité mettre l'accent sur la complexité des interactions entre phases et modes et la nécessité de compartimenter chacune des étapes dans un but de clarté. Ce compartimentage passe par l'analyse des flux entrant et sortant, des processus de transformation, de stockage et de transport mais aussi sur la connaissance des procédés de traitement qui sont au cœur de la chaîne de gestion.

Dans le paragraphe II.4, nous nous sommes attachés à découper et compartimenter la chaîne de gestion, ce présent paragraphe reconstruit et assemble le tout afin de visualiser dans sa globalité la chaîne de gestion. Pour ce faire, une analyse des chaînes de gestion pour tous types de déchets non dangereux a été effectuée. Cette analyse permet de comprendre les systèmes de gestion actuels—afin de pouvoir identifier les voies non utilisées ou peu considérées, toujours dans un objectif final de proposer des scénarios de gestion adaptés au contexte de l'étude.

Nous considérons pour chaque déchet répertorié une filière de traitement allant de la collecte au traitement en passant par une étape optionnelle de tri ou pré-tri. Afin de simplifier, seul l'exemple de la gestion des déchets ménagers en mélange selon une collecte à deux voies est détaillé avec pour optique le traitement des biodéchets.

III.5.1 **L'étape de collecte**

La collecte est une étape primordiale de la chaîne, c'est à partir de ce point que peut commencer le parcours de traitement du déchet. Comme précisé, nous étudions de manière précise le mode de collecte multi-matériaux à deux voies avec pour but le traitement à la fois des biodéchets mais également tous autres types de déchets ou sous-produits entrant et sortant des différents modes. Notamment par l'observation des phases de transformations, de transport et de stockage.

Dans un contexte local, les déchets ménagers sont collectés selon un mode de ramassage en porte-à-porte. Au travers de ce mode de ramassage, il est intéressant de considérer le type de transport, à savoir quel est le mode de transport par lequel les déchets sont amenés d'un point A à un point B. Il est également possible de retenir les étapes de stockage existantes durant le déplacement avant d'arriver au lieu de tri ou de traitement. A ce titre, il s'avère que le transport des déchets ménagers s'opère via des camions bennes de différentes tailles selon la largeur des voies de circulation, de capacité allant du 7t au 17t. Au vu du positionnement des unités de traitement sur le territoire une étape de stockage intermédiaire est nécessaire afin de réduire les coûts de transport.

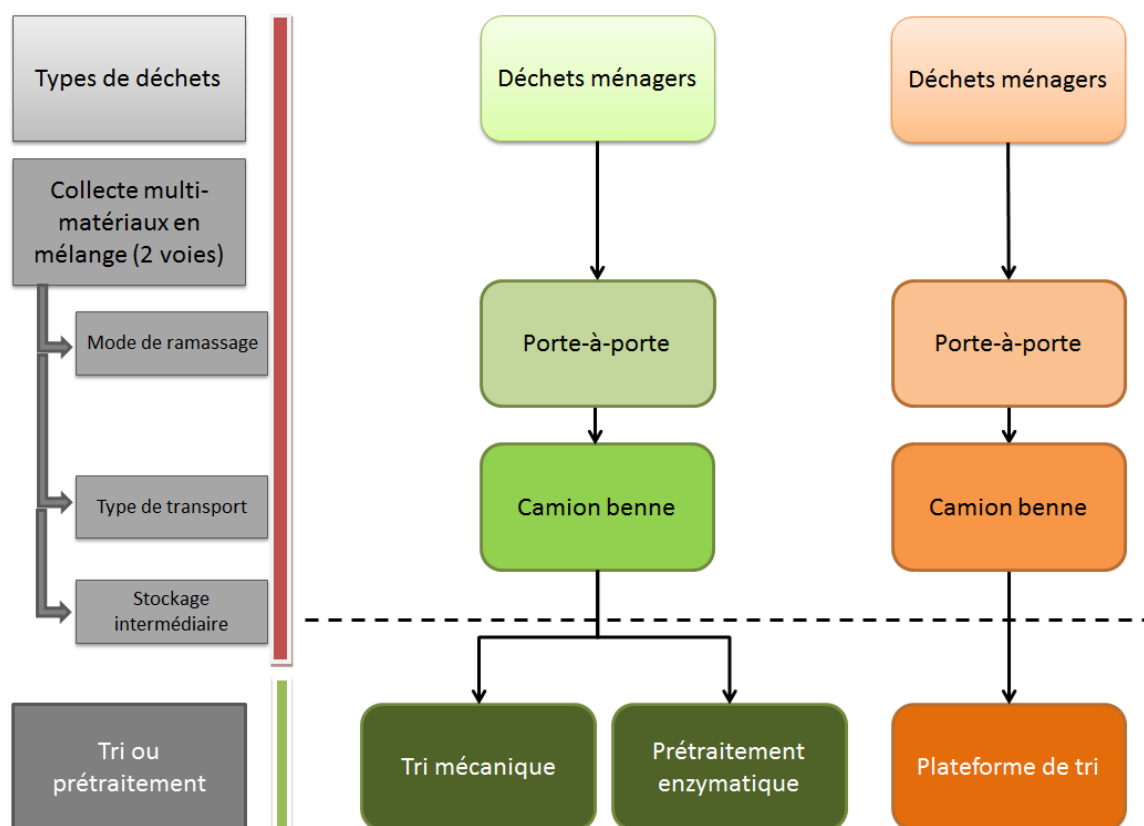


Figure 16 : Organigramme des étapes de collecte et de tri
(source : HATIK, 2015)

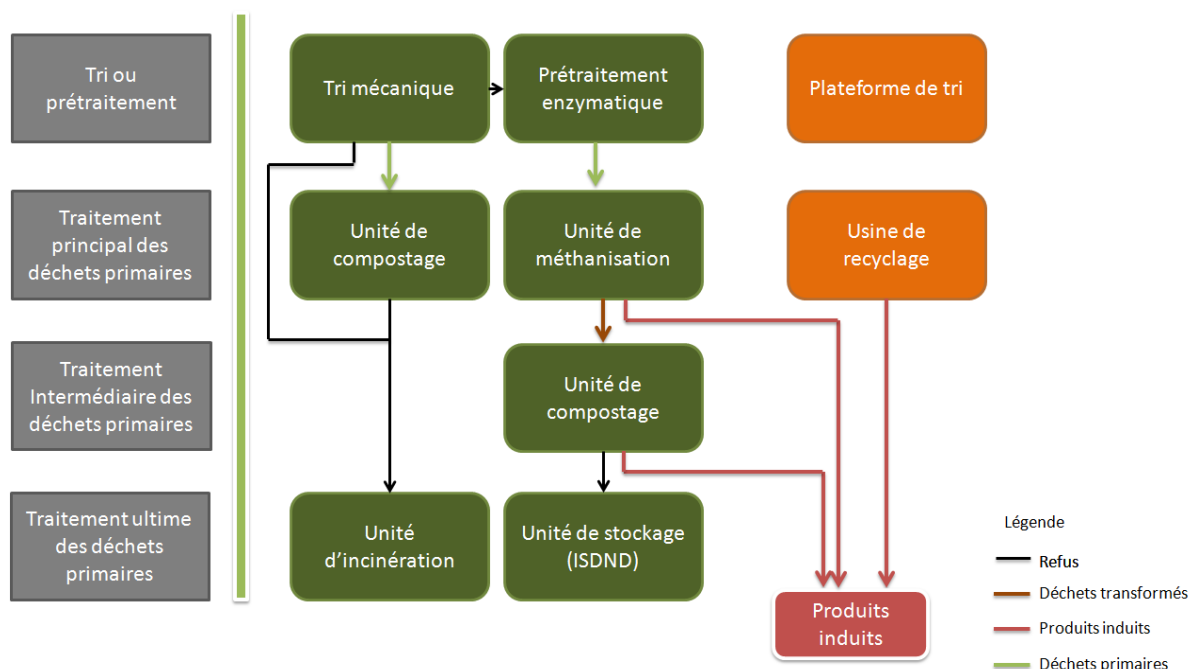


Figure 17 : Organigramme de l'étape de traitement des déchets primaires
(source : HATIK 2015)

Lors de cette étape de stockage intermédiaire, les déchets sont regroupés dans des camions de transport de plus grandes capacités « les cachalots » (Figure 16). Il est important de noter qu'à l'étape de collecte aucune phase de transformation n'est réalisée.

Au vu de ces analyses sur la phase de collecte des déchets ménagers à la Réunion, plusieurs points essentiels sont à retenir. En effet, d'une part, pour une collecte optimale les modes de ramassage et les types de transport doivent être adapté en fonction des volumes à gérer et d'autre part, la prise en considération à la fois des paramètres économiques et géographiques est primordiale.

III.5.2 **L'étape de tri ou de prétraitement**

Cette étape est une étape optionnelle. En effet, si le déchet est collecté à la source cette étape peut être sautée mais dans bien des cas elle se trouve considérée et intégrée dans le processus de traitement pour affiner le traitement qui suit. Par conséquent, le traitement et la valorisation des déchets organiques ou biodéchets vont dépendre essentiellement en premier lieu du mode de tri et de collecte. Si les biodéchets sont collectés en mélange, ils vont nécessiter une étape de prétraitement (collecte à deux voies). Dans le cas contraire, ils sont directement acheminés à l'unité de traitement (collecte à trois voies) (Figure 17Figure 16).

Donc dans le cas d'une collecte multi-matériaux en mélange, cette étape est primordiale pour séparer les biodéchets des autres déchets. Deux modes sont alors possibles, le tri mécanique et le prétraitement enzymatique. Le premier consiste à extraire individuellement chaque flux présent tandis que le deuxième opère selon une phase de transformation par liquéfaction des biodéchets. Il est important de garder en mémoire que ceci ne constitue pas une liste exhaustive des modes existants mais plutôt un aperçu des moyens communs ou des moyens possibles en voie de développement au niveau national et inéluctablement au niveau local.

Cette étape de tri ou de prétraitement des biodéchets à la Réunion n'existe pas. Le traitement des biodéchets ménagers n'est actuellement pas considéré dans la chaîne de gestion allant à l'encontre de la réglementation européenne imposée. C'est en ce point, que nous avons pu identifier une faiblesse dans la gestion locale. Cette observation nous renforce dans le choix d'étudier la gestion des biodéchets en milieu insulaire et des orientations à prendre en compte. Une fois que le biodéchet est collecté en mélange aucune action de détournement de ce flux n'est mise en œuvre. Ce point constitue un premier objectif d'action à considérer dans les propositions de scénarios.

A l'issue de cette étape et selon les modes considérés, les sortants correspondent respectivement aux différentes natures des déchets précitées à savoir : recyclables, organiques et ultimes. Les recyclables selon la composition de la chaîne de tri sont également séparés selon leur nature : plastique, cartons, métaux et verre. Il est à noter que les modes de tri mécanique et de prétraitement sont complémentaires et bien souvent retrouvés respectivement en série dans la chaîne de gestion.

En observant, l'articulation que peuvent avoir ces modules entre eux, il est plus aisé d'appréhender leur fonctionnement et de ce fait leur action et importance dans la chaîne de gestion.

III.5.3 **L'étape de traitement**

L'étape de traitement est située au centre de la chaîne. Comme précisé en amont, c'est elle qui détermine l'ensemble de la chaîne. En effet, le processus de transformation des déchets s'effectue par le biais de procédé de traitement. Ces procédés étant liés au caractère valorisable ou non des déchets, ils conditionnent toute la partie amont de la chaîne dans les choix des modes de collecte, de ramassage et de tri ou/et prétraitement.

Si nous prenons en compte les biodéchets, toujours issue des déchets ménagers, nous nous apercevons qu'ils peuvent être traités par l'ensemble des procédés de traitement qu'ils soient thermique, biologique ou physico-chimique. Mais ce qui va conditionner le choix de l'un ou l'autre de ces procédés est dans un premier temps l'objectif de traitement (le besoin final) et la qualité du déchet entrant.

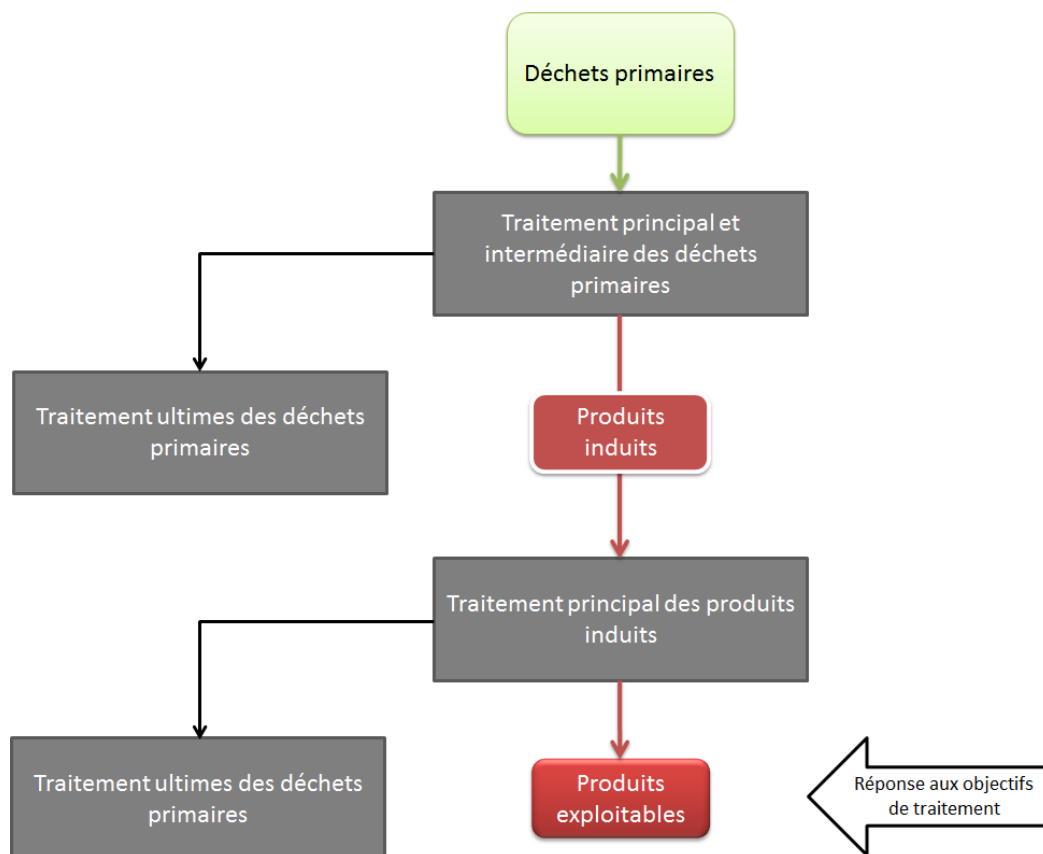


Figure 18 : Organigramme général de l'étape de traitement
(source : HATIK, 2015)

Les unités de méthanisation et de gazéification ont toutes deux besoin d'une bonne qualité des entrants. Une bonne qualité se traduit par le taux de pureté du flux. Plus le flux sera proche d'une qualité équivalente à une collecte à la source « flux propre » plus la qualité avant le traitement sera élevée et le traitement performant.

En plus de ces paramètres, il peut être identifié plusieurs types de traitement en fonction bien sûr de la nature du déchet mais aussi de l'avancement du traitement. Au cours de nos observations, nous avons pu constater des « inter-étapes » considérant le degré de transformation des sortants. Suite à ces observations, nous proposons une typologie des traitements en fonction de l'aboutissement du traitement à savoir : le traitement principal, le traitement intermédiaire et le traitement ultime. Intuitivement, le traitement principal constitue le procédé de traitement permettant la transformation attendue du déchet. Le traitement intermédiaire qui se situe en aval du traitement principal, s'apparente à un complément de traitement que nous appelons affinage de traitement. Et le traitement ultime est situé en fin de la chaîne permettant l'élimination des déchets résiduels.

Un biodéchet est un déchet valorisable. Par conséquent, sa transformation passe par une succession de traitements aboutissant à un traitement ultime. A l'inverse, un déchet résiduel n'ayant pas de partie valorisable au vu des moyens techniques et économique du moment sera directement éliminé selon un traitement ultime sans phase intermédiaire. Il en est de même pour les sous-produits. Les sous-produits engendrés au cours des différentes phases de traitement du déchet sont également considérés dans le système de gestion des déchets.

En effet, l'analyse menée sur l'étude de la chaîne de gestion a mis en exergue l'apparition de sous-produits au cours de la transformation des déchets. D'où la notion de sous-produits et la notion de sortie du statut de déchets introduit à la partie relative à la réglementation des déchets. De ce fait la transformation des déchets entrant dans un traitement principal induit la formation de sous-produits nécessitant eux même un traitement approprié que nous avons classé de manière similaire à savoir un traitement principal et ultime des sous-produits que nous appelons produits induits. Le terme de produit fait appel au caractère valorisable encore présent, et par conséquent, à extraire afin de répondre aux objectifs de traitement.

Afin de préciser les termes utilisés, nous considérons sous le vocable de déchets primaires, les déchets entrant dans un traitement principal, intermédiaire et ultime des déchets primaires. Une fois, les déchets primaires traités et transformés, nous les considérons sous le vocable de produits induits. Les produits induits constituent donc tous les produits valorisables sortant des traitements des déchets primaires. Au final, les produits induits sont dirigés vers les traitements de produits induits (Figure 18).

La gestion des déchets s'articule donc selon trois phases à savoir la phase de collecte, la phase de tri et/ou de prétraitement et la phase de traitement.

Chacune de ces phases se composent de différentes modes. La phase de collecte comporte des modes de ramassage (porte-à-porte et apport volontaire) ainsi que des types de transport permettant la mise en œuvre des modes de ramassage. La phase de tri et de traitement est articulée autour de plusieurs procédés selon le choix du mode de collecte. Les procédés que nous avons identifiés sont le tri mécanique, le prétraitement enzymatique et d'hygiénisation. Ils peuvent être associés ou considérés individuellement. Et la phase de traitement qui s'articule autour de plusieurs sous-étapes dites principales, intermédiaires et ultimes autour notamment des déchets primaires et des sous-produits. Cette dernière peut être scindée en deux, une considérant le traitement des déchets primaires et une autre phase considérant les sous-produits.

Dans un cadre appliqué à la Réunion, la gestion des déchets est centralement orientée vers la gestion des déchets ménagers autour de la laquelle s'articule les autres types de gestion (autres flux de déchets). En effet, la collecte s'opère selon une collecte à deux voies selon un mode multi-matériaux en mélange, c'est à dire que les déchets dits recyclables collectés en vrac (plastiques, métaux, cartons...) et que les autres déchets ménagers dits résiduels sont également collectés en vrac sans tri préalables des biodéchets.

Ces collectes s'effectuent selon un mode de ramassage en porte-à-porte avec l'utilisation si nécessaire de plateformes de transit. Une fois collectés, les déchets recyclables sont triés selon un procédé de tri mécanique afin de différencier les différentes familles de recyclables qui seront conditionnés et exportés dans la zone océan indien pour être traités par valorisation matière. Les déchets résiduels sont simplement acheminés en ISDND. Tous les refus de tri des recyclables et des autres filières de valorisations locales sont également enfouis. Un approfondissement des filières locales de gestion des déchets est développé dans le contexte réunionnais maintenant que la chaîne de gestion générale a été présentée.

Afin de nous familiariser avec tous ces modes de traitement et cette chaîne de gestion, nous avons réalisé une bibliographie sur la gestion des déchets et ses applications. C'est à partir de ces lectures que nous avons pu nous forger un avis sur la question. Pour cela, nous proposons une synthèse des références que nous avons classé par pays :

Pays	Thème	Références
Afrique	Gestion des déchets	Parrot, 2009
Bangladesh	Modèle urbain de gestion des déchets ménagers	Sufian, 2007
Dublin	Etude des comportements face à la gestion des déchets	Purcell, 2010
Inde	Gestion des déchets ménagers	Gupta, 1998
Inde et Tanzanie	Model durable de recyclage	Schoot Uiterkamp, 2011
Japon	Séparation à la source des déchets	Shigeru, 2011
Kenyan	Gestion des déchets ménagers	Henry, 2006
Maurice	Politique d'énergies renouvelables	Elahee, 2011
	Politique d'énergies renouvelables	Palanichamy, 2004
Nigeria	Valorisation des déchets ménagers	O.F , 2007
Suède	Modélisation des systèmes de gestion des déchets	Eriksson, 2011
	Gestion intégrée des déchets et Energies Renouvelable	Eriksson, 2014
	Energie renouvelable et déchets	Ljunggren Söderman, 2003
	Approche systémique de gestion des déchets	Sundberg, 1994
UE	Energie Renouvelables et électricité à partir de biomasse	Jäger-Waldau, 2005
	Analyses des techniques de gestion des déchets	Pires, 2011
Pays en voie de développement	Gestion intégrée des déchets ménagers	Marshall, 2013
Pays Asiatiques	Comparaison des gestions des déchets	Matsuto, 2014

IV. Le contexte réunionnais

Puisque que notre étude porte sur le territoire réunionnais, il semble opportun d'en décrire le fonctionnement du point de vue de la gestion des déchets. Nous verrons notamment comment s'organise cette gestion sur l'île par la mise en évidence des équipements existants. Nous préciserons également les projets en cours ou à venir et enfin le contexte énergétique dans lequel nous nous intégrons.

IV.1. La gestion des déchets à la Réunion

Au travers de la gestion des déchets, les infrastructures présentes sont observées afin d'identifier le système actuel de gestion. Cette identification passe par la connaissance des équipements et leurs localisations ainsi que le mouvement des flux vers ces différentes structures de traitement et des gisements associés. Enfin, nous considérerons les projets présents et futurs dans le but d'établir une vision globale des orientations locales sur le sujet.

IV.1.1 Les équipements existants

Il est essentiel de cibler les équipements de gestion des déchets existants ainsi que leur localisation sur le territoire afin d'appréhender au mieux l'organisation actuelle. Cette observation permet de cibler les points forts et les points faibles actuels et ainsi que de pouvoir les pallier dans nos scénarios de gestion. Afin de rester dans une continuité, nous nous attachons à présenter ces équipements correspondant aux procédés de traitement selon les modes de traitement toujours dans le cadre de la gestion des ordures ménagères à deux voies.

La valorisation matière des recyclables ménagers s'effectue par l'intermédiaire de procédés de tri mécaniques. Ces procédés sont au nombre de trois et se situent sur les pourtours de l'île : au sud (Saint-Pierre), à l'ouest (Le Port) et au nord (Sainte-Marie). Ils permettent de séparer donc de séparer spécifiquement chacun des flux de recyclables produits par les ménages. A l'issue de ce tri, les flux sont exportés selon des destinations différentes dans la zone de l'Océan Indien. Outre la gestion des recyclables des ménages, la Réunion possède également des procédés de tri mécanique : deux plateformes de tri des déchets du BTP (une au sud à Saint-Pierre et une au nord à Sainte-Suzanne) et une plate-forme des encombrants au sud à Saint-Pierre.

La valorisation organique (gestion des biodéchets) concerne ici les déchets verts. Il s'agit à leur actuel du seul flux collecté à la source directement produit par les ménages afin de subir une valorisation organique. La valorisation s'opère selon deux process: le compostage en andain ou le broyage. Les procédés sont donc de deux types selon les process énoncés et sont répartis autour de trois stations de compostage (Saint-Leu à l'ouest, Saint-Pierre au sud et Sainte-Rose à l'est) et une station de broyage (Le Tampon au sud). Une fois le compost produit ou broyé, il est vendu aux entreprises et particuliers intéressés. En plus de la valorisation des déchets verts, les boues de stations d'épuration peuvent aussi être observées. Actuellement, les boues de STEP sont enfouies du fait d'une non-conformité à la réglementation sur l'épandage des boues. Cependant une petite quantité de ces

boues bénéficie d'une dérogation pour être épandues. Des études sont en cours afin de les associer aux déchets verts dans un processus de co-compostage à Saint-Joseph.

Les déchets ultimes ou encore refus de tri sont traités via des procédés d'élimination. Les procédés d'élimination à la Réunion sont uniquement de types installations de stockage spécifique aux déchets non dangereux (ISDND). Les ISDND sont au nombre de deux, une au sud (Saint-Pierre) et une au nord (Sainte-Suzanne). Ces deux ISDND sont équipées de capteurs de biogaz ainsi que d'une installation de traitement des lixiviats. La gestion des déchets fonctionne essentiellement autour de ces deux installations saturées d'où l'urgence de solutions alternatives.

Parmi ces installations de tri, de valorisation et d'élimination, il est important de considérer les installations de production d'électricité à savoir, trois centrales thermiques, dont deux fonctionnant au charbon et à la bagasse (Figure 19). Une étude est en cours afin d'envisager le traitement de déchets verts dans ces centrales à charbon afin d'optimiser le mix énergétique local. Ces unités thermiques présentent donc un intérêt à prendre en compte dans nos scénarios.

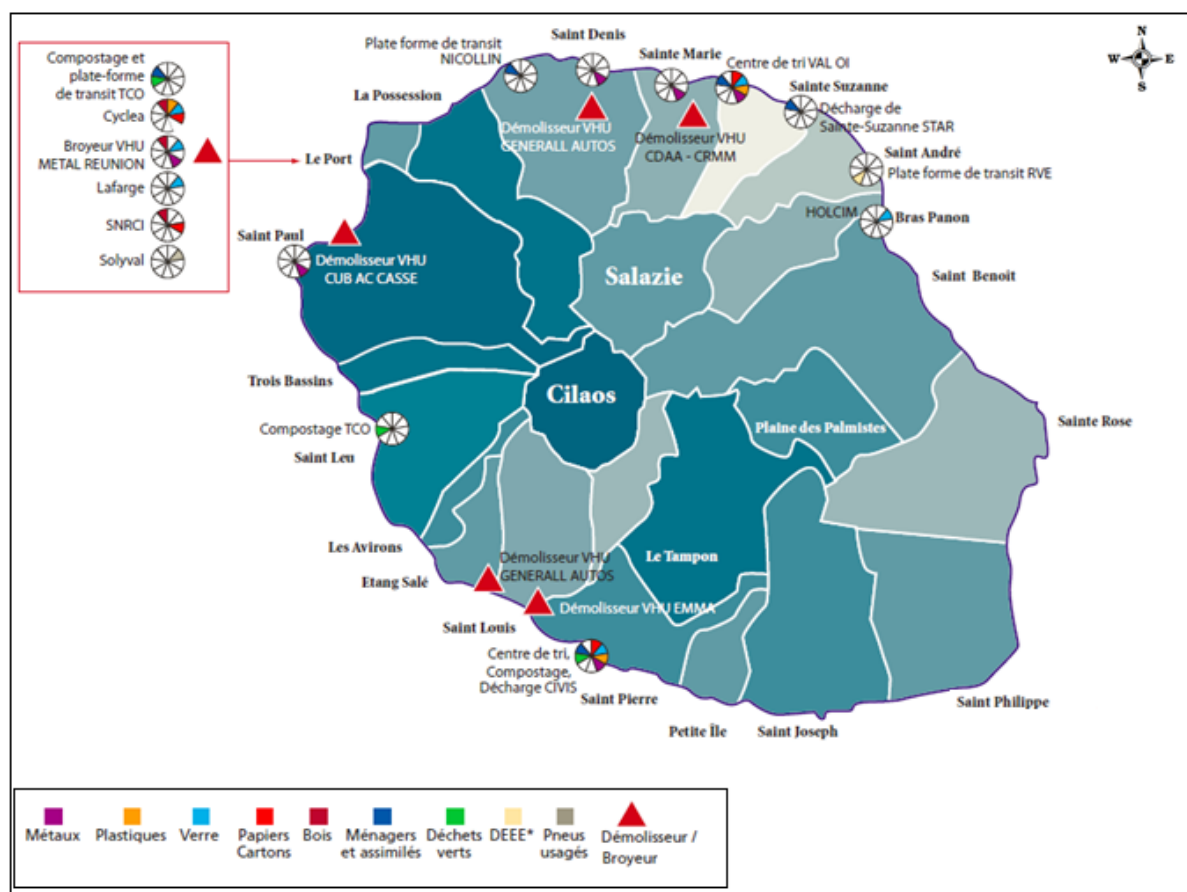


Figure 19 : Les équipements actuels de traitement des déchets à la Réunion (source : HATIK, 2012)

Après avoir considéré l'organisation des équipements existants autour de l'exemple des déchets ménagers, il semble intéressant de présenter les autres installations existantes favorisant la valorisation des recyclables non dangereux autres que ménagers. Ces déchets peuvent concerner les emballages plastiques industriels, les pneus, les déchets électroniques et électriques. A titre d'exemple, les plastiques industriels de type PET (polyéthylène téréphtalat) sont nettoyés et broyés pour la fabrication de citernes et autres récipients de grandes contenances. Les pneus sont transformés sous forme de granulés afin de servir de sol protecteur pour les aires de jeux ou encore comme sous-couche des remblais routier. Et les déchets électroniques et électriques sont démantelés en pièces détachées pour une seconde utilisation.

Nous pouvons également introduire, la présence d'une unité de traitement thermique de type incinérateur des déchets carnés située au sud, à l'étang-salé les bains (Sica des Sables) permettant la production de farines animales. Ces farines sont valorisées pour la production d'une chaîne locale d'aliments pour chiens.

Pour conclure, la gestion des déchets à la Réunion repose donc sur deux ISDND, trois centres de tri, un centre de tri des déchets du BTP, trois stations de compostage, une station de broyage, et deux plate formes de tri des encombrants. En plus, de ces éléments clés, tout un panel de prestataires de services privés s'attachent à revaloriser localement ou par exportation l'ensemble des déchets recyclables des professionnels et des particuliers (une liste est présentée en annexe 9).

La Réunion est, selon un point de vue personnel pauvre en unités de traitement. En effet, la stratégie de traitement des déchets ou plutôt d'élimination des déchets repose entièrement sur les ISDND. Or, la saturation de ces sites oblige à revoir intégralement cette gestion.

Nous avons pour cela les plans locaux d'urbanisme tels que (*PDPGDND*, *PRPGDD*...) qui nous imposent une ligne de conduite à suivre pour faire face aux différents bouleversements pouvant être engagés par cette saturation aggravée par l'accroissement démographique et la vision proche du million d'habitant.

C'est pourquoi, il est important à ce stade de présenter clairement les objectifs de traitement visé par le PPDGDND. Le PPDGDND prévoit la mise en place d'un certain nombre d'installations de traitement autour de trois scénarios de traitement. Les installations à mettre en place dans le cadre de ces scénarios de gestion sont présentés dans la Figure 20.

Nous avons pu constater qu'un certain nombre d'actions étaient envisagées par la gouvernance réunionnaise afin d'améliorer la situation critique de l'île au niveau de la gestion des déchets ménagers et des biodéchets. Néanmoins, au regard de ce plan certaines incohérence peuvent être relevées comme la mise en place de deux incinérateurs (notés UVE traduit par unité de valorisation énergétique), un au sud et un au nord.

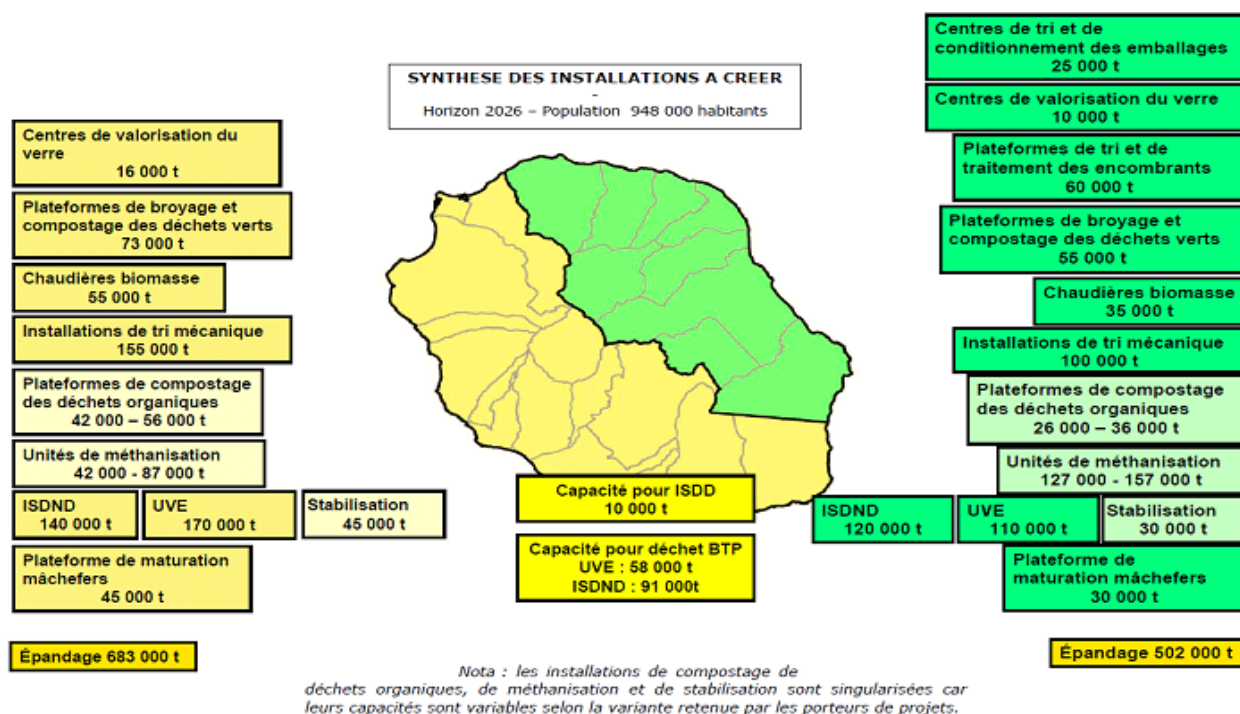


Figure 20 : La synthèse des installations à mettre en place dans le cadre du PPGDND (source : PPGDND, 2014)

La présence de deux installations de tri mécanique peut également être notée, à traduire comme des installations permettant l'extraction des biodéchets (FFOM) présents dans les ordures ménagères. L'incohérence réside dans le fait d'associer à la fois des incinérateurs à des unités de tri mécanique. Certaines associations ne sont pas favorables au sens de la production de déchets. Comme présentées, la production des déchets à la Réunion n'est pas suffisamment élevée pour permettre le développement et la multiplicité d'unités d'échelle territoriale. En effet, ces unités sont de grosses consommatrices de déchets nécessitant le détournement total des flux (toutes catégories confondues) compromettant ainsi l'existence d'autres filières plus favorables au contexte insulaire et au développement économique de l'île. D'autres points peuvent aussi être soulevés comme la préconisation de deux ISDND et d'un ISDD. Au vu de la saturation des ISDND actuels, il semble en effet intéressant de considérer le besoin d'en installer d'autres outre que le fait qu'une étude menée par le BRGM ait montré l'inexistence de tels sites sur le territoire. Au vu des particularités géographiques et démographiques. Cette analyse succincte pourrait être plus amplement développée mais ne constitue pas le cœur de notre étude. Nonobstant le fait que certaines incohérences subsistent dans les choix de la gouvernance autour du traitement des biodéchets, il nous semblait important de présenter un certain nombre de projet existant et à venir sur le territoire réunionnais (Figure 21).

	DMA		DAE	TOTAL
	TONNAGES COLLECTÉS 2011	RATIOS 2011	TONNAGES ESTIMÉ 2011	
OMR	236 096 t	287,5 kg/hab./an	-	236 096 t
Déchets industriels et IAA	-	-	376 000 t	376 000 t
Sous-produits assainissement	22 700 t	27,6 kg/hab./an	-	22 700 t
Biodéchets	5 293 t	0,6 kg/hab./an	12 800 t	18 093 t
Déchets verts	149 902 t	182,6 kg/hab./an	4 200 t	154 102 t
Déchets agricoles	-	-	752 100 t	752 100 t
Déchets carnés	-	-	10 000 t	10 000 t
Déchets graisseux	-	-	7 000 t	7 000 t
Emballages recyclables et JRM	29 989 t	36,5 kg/hab./an	20 300 t	50 289 t
Cartons	508 t	2,5 kg/hab./an	24 500 t	25 008 t
Verre	8 531 t	10,4 kg/hab./an	3 900 t	12 431 t
Encombrants	84 496 t	102,9 kg/hab./an	-	84 496 t
Ferrailles	5 336 t	6,5 kg/hab./an	27 400 t	32 736 t
Bois et palettes	-	-	17 400 t	17 400 t
Textiles et chaussures	Non disponible	12 kg/hab./an*	-	0 t
Pneumatiques usagés	4 265 t	5,2 kg/hab./an	2 591 t	6 856 t
TOTAL	547 115 t	666,3 kg/hab./an	1 258 191 t	1 805 396 t

* Gisement national de référence

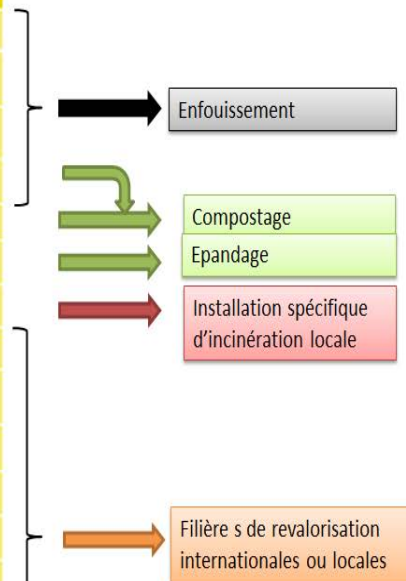


Figure 21 : Synthèse des gisements et des voies de traitement (source : PPGDND, 2014)

IV.1.2 Présentation des infrastructures réunionnaises actuelles et des projets à venir

Afin d'approfondir nos connaissances sur la gestion des déchets réunionnaise, il semble important d'observer les projets en cours ou à venir dans le but d'identifier les approches locales, toujours dans l'optique de s'inspirer de l'existant pour la conception des scénarios de gestion proposés dans le cadre de cette étude.

Nous nous attachons, principalement à présenter les projets d'installations innovantes ainsi que tous les projets de traitements du gisement biomasse sur l'île. Les projets ayant retenu particulièrement notre attention concernent la station d'épuration du Grand Prado, les projets de méthanisation et de gazéification recensés dans une étude de la Région.

IV.1.2.1 La station d'épuration du Grand Prado

Ce chantier est sûrement le plus important et innovant mis en place sur l'île dans une vision de gestion durable des eaux usées. Il est vrai que la situation actuelle sur l'île en termes de traitement des eaux usées est loin d'être optimale. Mais cette situation tend à changer notamment depuis la sortie de la Directive Européenne

« Eaux Résiduaires Urbaines » mise en place par le MEEDDAT. C'est dans l'optique de répondre aux besoins en traitement de ces eaux résiduaires que la CINOR a lancé un appel d'offre pour augmenter sa capacité de traitement sur les communes de son périmètre, au lieu-dit le Grand Prado à Sainte-Marie.

Cette station a une capacité prévue de 165 000 équivalents habitants avec une possibilité d'extension à 235 000 équivalents habitants. Cette station a la particularité d'être couplée à une unité de méthanisation comprenant deux digesteurs de 300m³. Cette procédure permet non seulement de réduire et d'hygiéniser les boues mais aussi de produire de l'électricité à hauteur de 1,6GWh, soit 500 ménages réunionnais et de la chaleur pour alimenter les digesteurs et le processus de séchage des boues. En effet, en plus de l'unité de méthanisation, le projet comporte également un système de séchage thermique des boues (atteindre une siccité à 90°C) divisant ainsi le volume par 4. Ce séchage est suivi d'une étape de chaulage favorisant la valorisation agronomique des boues.

Par ailleurs, le traitement des boues repose sur trois procédures : « boue activée à faible charge, avec nitrification-dénitrification combinée, et déphosphatation biologique complétée par une co-précipitation physico-chimique. ».

Ce projet performant est pleinement inscrit dans une démarche de respect de l'environnement en intégrant l'unité au paysage autour de plusieurs actions : en recouvrant de végétaux les façades et toitures des bâtiments, en réintroduisant aux abords de la station une flore et faune endémique, en réutilisant les eaux grises de traitement pour l'irrigation, en valorisant les boues en engrais, en produisant de l'énergie renouvelable à partir des boues via un système de cogénération, à partir aussi de panneaux photovoltaïques installés sur le site et des procédés d'hydroélectricité. La station se veut également inodore grâce un traitement et une désodorisation de l'air ainsi que la présence olfactomètres électriques. Le tout dans un respect du voisinage avec l'élaboration d'une « charte verte » pour pallier et gérer les nuisances sonores engendrées par le chantier et le fonctionnement des machines de la station. Ces considérations environnementales ont permis à ce projet d'obtenir une triple certification QSE (Qualité-Sécurité-Environnement) : ISO 9001, ISO 14001 et OHSAS 18001 / ILO-OSH. Cette station est fonctionnelle depuis 2013.

IV.1.2.2 *Projet existant l'unité de méthanisation des vinasses de la Rivière du Mat*

Cette unité est en fonction depuis 2011. Le biogaz est valorisé sous forme de chaleur via des chaudières. Cette valorisation permet de substituer 700 tep de fioul, utilisés pour le fonctionnement de l'installation (ARER 2012).

Tableau 6 : Présentation des projets envisagés sur la Réunion

Projet	Type de déchets	Puissance/tonnages
Unité de méthanisation de Crête d'Or (2015)	Déchets d'abattoirs	5 100t
Valorisation biogaz en ECS pour les abattoirs	Déchets maraichers	7 200t
	Lisiers	
Unité de méthanisation du Groupe HCE (étape de faisabilité)	Déchets organiques zone sud	Deux unités de méthanisation de 1MWe et 3 MW et une de gazéification de 2 MW
Unité de méthanisation des abattoirs Duchemenn et Grondin (étude de faisabilité)	Déchets d'abattoirs	90 kWe
	Effluents du groupe « fermiers sud »	
Unité de méthanisation du Tampon	Effluents	11 000 tMS
	Déchets d'IAA	150 tMS
Unité de méthanisation territoriale de Bras-Panon	Effluents	2 100 tMS
	Déchets d'IAA	600 t
		400 kWe
Unité de méthanisation territoriale de Saint-Paul	Effluents	7 000 tMS
(Valorisation du biogaz sous forme de chaleur pour bâtiment d'élevage de volailles)	Déchets d'IAA	200 tMS
		900kWe
Unité de méthanisation de Saint-Pierre	Effluents	4 100 tMS
	Déchets d'IAA	50 tMS
		900 kWe

IV.1.2.3 Projets à venir

En 2011, La Région a publié un Schéma Directeur Méthanisation Biomasse (SDMB). Ce schéma relate les projets de méthanisation et de gazéification en cours de réalisation et ceux qui sont encore à l'étape de faisabilité. Ceci afin de proposer la mise en place de filières pertinentes pour favoriser la production d'énergie à partir de la biomasse présente sur l'île. Les scénarios élaborés à termes présenteront une planification de projets à développer à l'horizon 2020/2030.

Ces divers projets envisagés ont été répertoriés à l'échelle de l'île (Tableau 6).

A ces projets, nous pouvons également comptabiliser les projets de gazéification soutenus en partie par le Pôle d'Excellence Rural (PER) dans le cadre du développement de la filière bois-énergie à la Réunion. Cette filière bois-énergie vise à mobiliser les ressources forestières des hauteurs de l'île, à savoir le bois d'acacia et le bois de cryptomeria. L'acacia constitue une peste végétale dont environs 50% pourraient être utilisés pour la gazéification, soit 400 hectares. Le cryptomeria est utilisé comme bois d'œuvre géré par l'ONF, à ce titre les résidus de l'exploitation forestière seraient détournés pour la gazéification. Deux unités de gazéification sont prévues en secteur agricole, une à Saint-Paul et une autre à Saint-Joseph au sein d'exploitation et de distillation de géranium dans un but de diversification agricole. Deux autres projets sont à l'étude, cette fois ci en secteur forestier à Bras-Sec (Cilaos) et Terre Plate (Salazie).

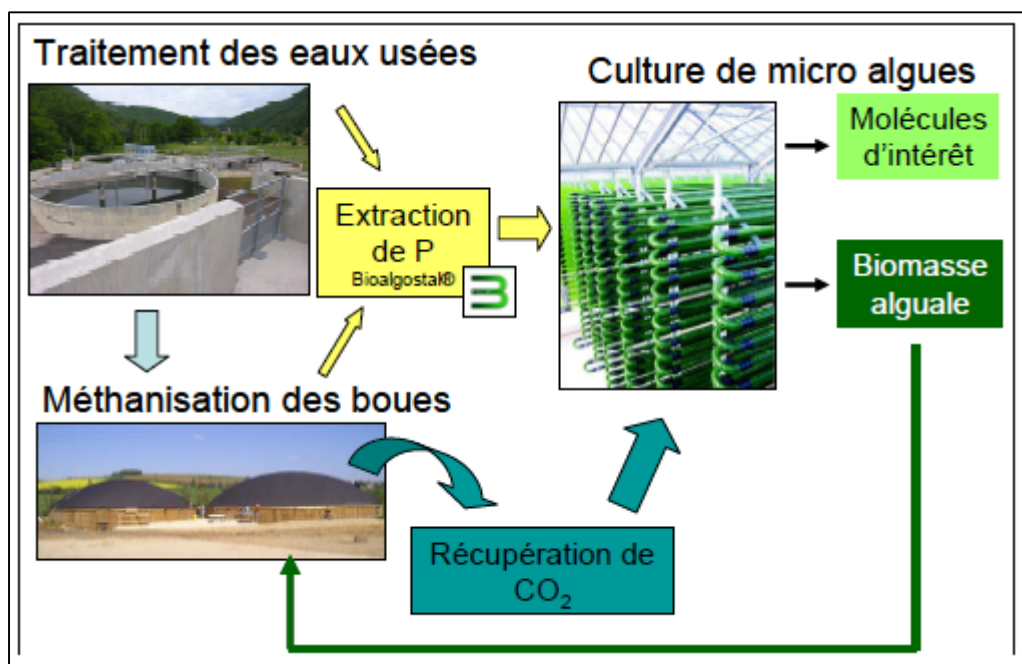


Figure 22 : Processus de traitement des boues de STEP par des micro-algues (source : Bioalgostal)

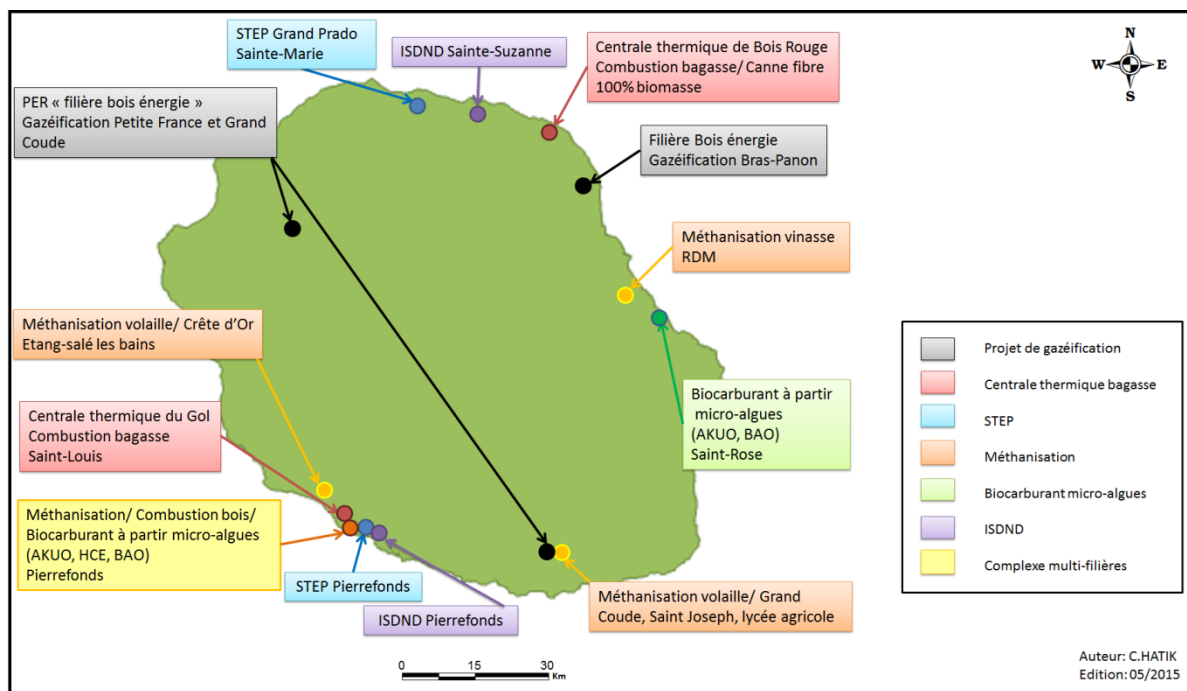


Figure 23 : Synthèse des projets de valorisation énergétique de la biomasse (source : PER ; HATIK, 2010)

La Réunion dans sa démarche d'autonomie énergétique souhaite également concrétiser des projets de synthèse de biocarburants. Ces projets sont divers :

- La récupération des huiles alimentaires usagées à raison de 100l/mois permettrait de produire 500t/an de biocarburant liquide.
- La valorisation des résidus de distillation pour produire du bioéthanol pour le diluer à 1% dans les carburants fossiles.
- Et la production de biocarburant liquide à partir de micro-algues. Cette solution est de loin la plus performante. En effet, la société Bioalgostal implantée sur l'île travaille sur une production à échelle industrielle de 3ème génération. Ce projet devrait voir le jour à partir de 2016. Bioalgostal a notamment étudié le traitement des boues de STEP par l'intermédiaire des micro-algues (Figure 22). Ces micro-algues se nourrissant de CO₂ sont aussi efficaces pour traiter les fumées riches en dioxyde de carbone (Singh, 2010).

Nous avons pu voir au fil de ces projets que la Réunion tend vers une réelle politique de traitements des déchets organiques. C'est pourquoi, nous nous sommes particulièrement intéressés à ces déchets. Le domaine du traitement des déchets organiques étant relativement vierge sur l'île, nous avons une large possibilité d'action pour proposer des scénarios inspirés de tous les procédés étudiés ainsi que de la politique réunionnais. La Figure 23 présente la synthèse de tous les projets.

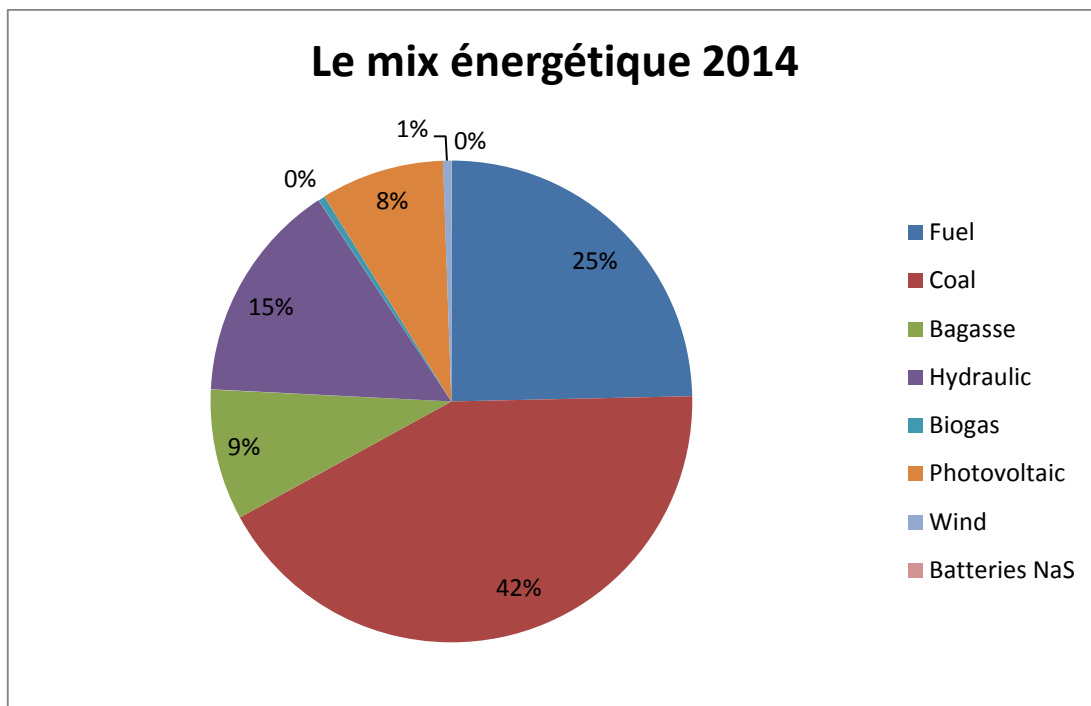


Figure 24 : Production électrique totale par type d'énergie en 2014

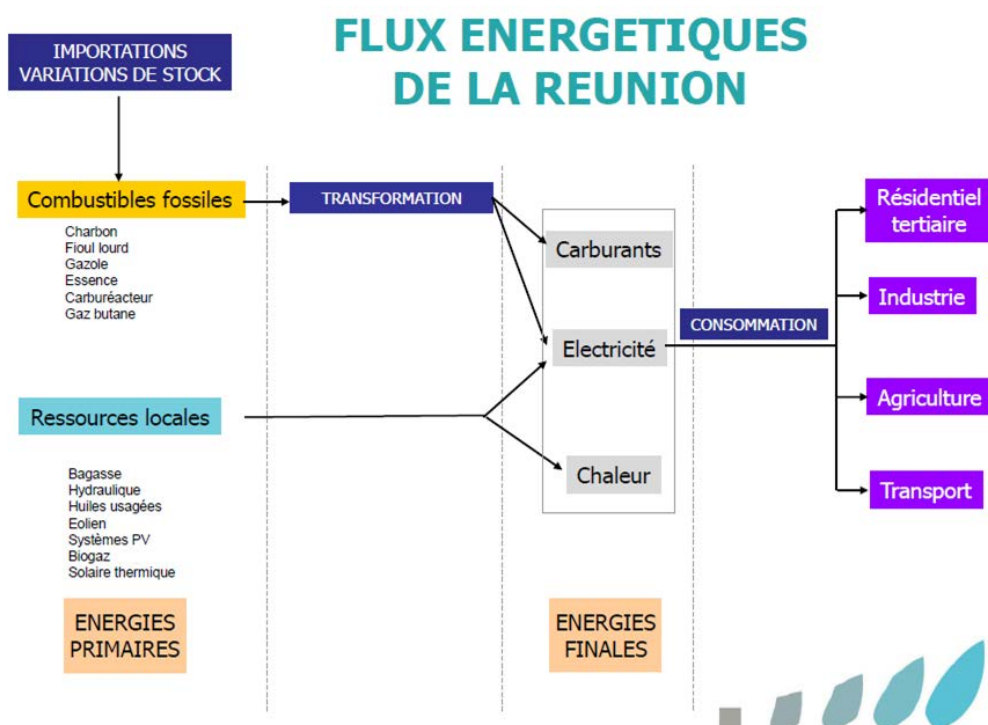


Figure 25 : Les flux énergétique de la Réunion (OER, 2011)

Les projets sont nombreux et fort intéressants pour le développement de l'île et une gestion raisonnée des déchets organiques émetteurs de GES. Mais il semble que malgré les idées et lesancements d'études de faisabilité, ces projets sont, dans leur majorité, difficiles à concrétiser. Il serait donc bien venu d'identifier les freins ralentissant la réalisation de ces projets. Il semble néanmoins plausible que l'investissement économique important des unités de traitement majoré pour les DOM du fait de l'octroi de mer ainsi que le manque d'expérience et de compétence en la matière sur place nécessitent de lourdes études devant intégrer un phénomène insulaire.

Au vu de ces constatations et de la situation d'urgence de l'île, nous devons prendre conscience qu'il est important de considérer toutes les possibilités de traitement disponibles. Et ce afin d'éviter la mise en place de gestion temporaire (à court terme) face à la précipitation qui ne saurait qu'augmenter l'investissement économique final. C'est pourquoi, nous proposerons dans nos scénarios plusieurs possibilités de traitement au vu des différents besoins de l'île qu'ils soient énergétique ou matière.

IV.2 Le contexte énergétique réunionnais

Aujourd'hui, l'importation de charbon et de fioul constitue une part importante des énergies fossiles utilisées sur l'île. Nous l'avons vu en introduction, la production électrique en 2014 s'élevait à environ 2857 GWh produits à partir d'énergies fossiles. Le reste de la production provenait des énergies renouvelables (33,8%) comme l'énergie hydraulique, l'énergie photovoltaïque, l'énergie éolienne, le biogaz, la bagasse et les batteries NAS (OER, 2014) (Figure 24). La consommation énergétique la même année avoisinait les 2597,3 GWh. Les deux principaux postes de consommation concernent actuellement le carburant en relation avec les activités de transports et de l'électricité. Une étude menée par le laboratoire PIMENT présente également l'ensemble des énergies renouvelables à la Réunion ainsi que leur potentiel énergétique dont la biomasse (Praene, 2012).

La Figure 25, décrit de manière synthétique les flux énergétiques à la Réunion. L'énergie produite est utilisée à trois fins : pour le transport, la production d'électricité et de chaleur. Le transport représentant le secteur le plus consommateur. Le tableau expose également les besoins totaux en méthane pour le secteur routier et la production d'électricité qui sont les deux postes de consommation d'énergie fossiles. Il s'agit donc des postes à considérer pour une substitution au biogaz pour pouvoir pallier en partie à la consommation de combustibles fossiles.

Comme nous l'avons vu la part des énergies fossiles dans le mix énergétique est très élevée. L'utilisation de ces énergies pour la production d'électricité principalement à partir de charbon engendre une émission de 1990 kt CO₂ qui représente à l'échelle d'un habitant une moyenne annuelle de 2,35 t CO₂.

Notre étude entre pleinement dans ce cadre local qui consiste à promouvoir la production d'énergie renouvelable à partir de la biomasse et plus précisément des biodéchets afin de s'affranchir peu à peu des énergies fossiles actuellement utilisées en l'occurrence le charbon et le fuel. Nous pourrons ainsi déterminer à quelle

hauteur il nous est possible d'agir sur le mix énergétique et ainsi contribuer à l'autonomie énergétique de l'île.

Les contextes de la gestion des déchets étant maintenant appréhendée autour de multiples analyses à différentes échelles, il nous est alors possible de définir notre méthode d'action toujours dans un but final de proposer des scénarios de gestion viables des biodéchets sur l'île de la Réunion. Ces scénarios tenteront de répondre au maximum aux besoins observés notamment énergétiques.

Nous aurons à cerner plusieurs paramètres autour de l'observation des scénarios de gestion et de traitement des déchets, essentiellement autour de problématiques technologiques, économiques, sociaux et politiques. Ces paramètres sont au cœur de toutes les analyses guidant les décisions des pouvoirs publics. De nouveaux paramètres devront intervenir de plus en plus dans nos choix, ils concernent les impacts environnementaux, notamment liés au changement climatique. Ils ont été jusqu'à présent peu pris en compte dans les analyses qui ont été conduites autour de la gestion et du traitement des déchets. Nous nous proposons de les intégrer de manière significative, pour répondre à des préoccupations, de plus en plus primordiales dans toutes les strates de nos sociétés.

V. Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons pu extraire un certain nombre d'informations autour de la gestion des déchets. Cette gestion est encadrée par un contexte réglementaire très fourni et strict permettant de répondre aux problématiques de la protection de l'environnement et de la santé humaine. De plus notre état de l'art fait référence aux multiples déchets existants dangereux ou non dangereux nécessitant chacun une voie de traitement spécifique. Ces voies présentant, elles même une multitude de procédés de traitement mais également de tri et de collecte. En effet, au vu de tous ces points, il semble pertinent de prendre en compte le caractère complexe des systèmes que nous souhaitons explorer.

La crédibilité de nos scénarios de gestion et de traitement des déchets reposent avant tout sur une évaluation précise des caractéristiques des gisements de déchets, notamment autour d'une analyse spatiale adéquate. Nous chercherons donc, dans un premier temps, à cerner un outil d'analyse statistique la plus appropriée afin de mener à bien cet objectif. Nous avons retenu l'outil d'analyse en composante principale qui nous permettra de situer les gisements de déchets selon leurs caractéristiques les déterminantes.

Le choix des scénarios devra également découler d'une analyse la plus rigoureuse possible autour d'indicateurs d'évaluation remarquables, d'où la nécessité de cerner un outil d'analyse multicritères nous permettant d'argumenter autour des orientations et choix préconisés. Un outil spécifique pourrait être mis en œuvre pour mieux s'adapter au cadre de notre étude.

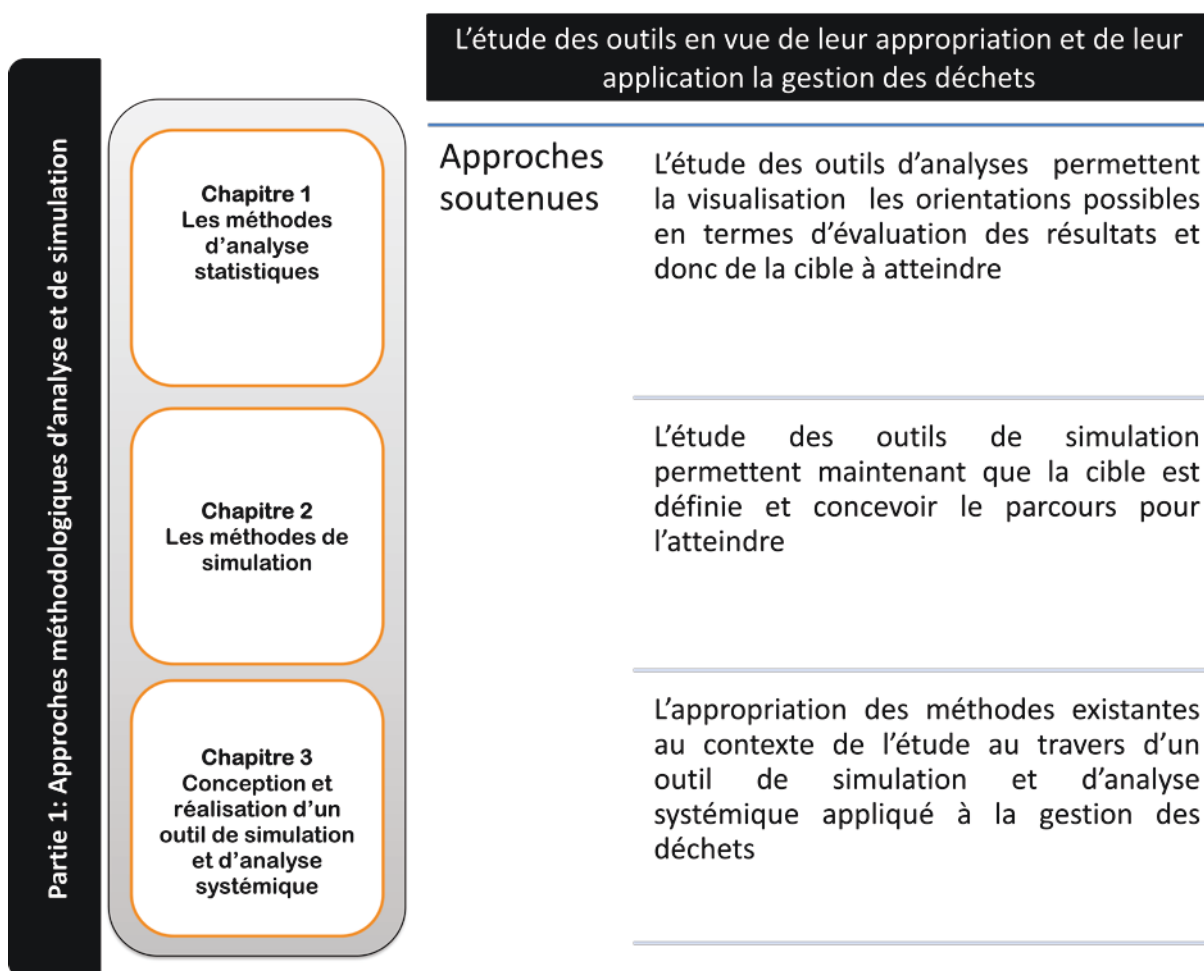
Ces deux objectifs méthodologiques feront l'objet d'une présentation plus précise dans le prochain chapitre de la thèse. Ils donneront lieu à des développements

ultérieurs autour d'applications concrètes concernant le gisement de déchets ainsi que la construction et le choix des scénarios de gestion et de traitement de déchets. Ces développements seront présentés respectivement dans l'avant dernier (chapitre 4) et le dernier chapitre (chapitre 5) de la thèse.

Afin de mener à bien la construction de scénarios, il apparaît important de pouvoir décrire et modéliser les différentes phases de gestion et de traitement de déchets en vue de mettre en œuvre certaines simulations de fonctionnement des systèmes observés. Cet objectif pourrait être mené à bien à partir de la mise en œuvre d'outils de description de ces systèmes. Nous cernerons donc dans un premier temps un cadre méthodologique de conception de ces outils autour notamment de l'analyse systémique et de l'Analyse de Cycle de Vie. Nous nous référerons à ce cadre pour mettre en œuvre un outil permettant une description globale exhaustive, mais détaillée non exhaustive des différents sous systèmes associés aux modes et phases de traitement autour des procédés de traitement, des unités fonctionnels, des opérations unitaires et des appareils les composant. Ces deux principaux objectifs de notre travail de recherche seront présentés dans deux chapitres centraux de la thèse portant sur les aspects méthodologiques et les aspects de conception et de réalisation.

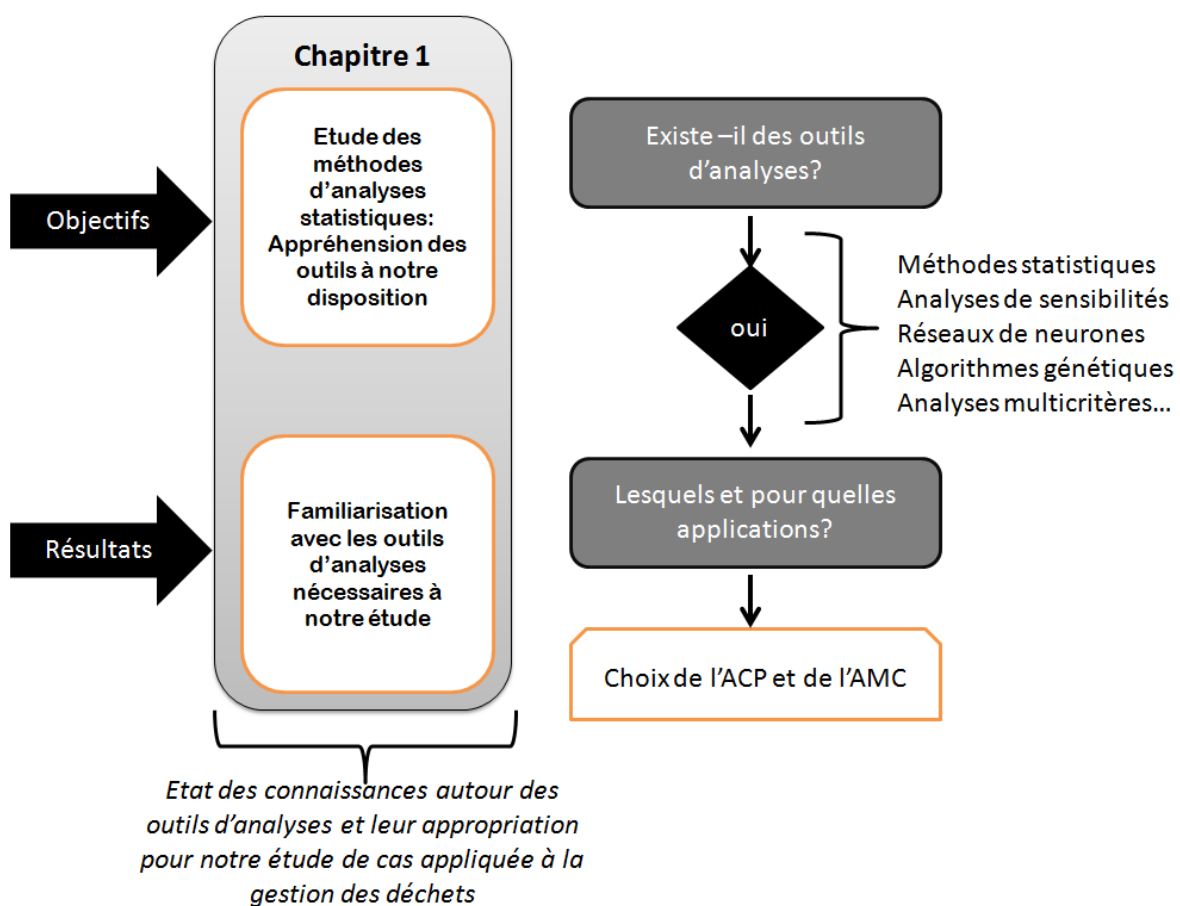
Partie 1

Approches méthodologiques d'analyse et de simulation



Chapitre 1

Outils d'analyses mathématiques



Sommaire

I. Introduction	103
II. L'Analyse en composante principale (ACP).....	104
II.1 Démarche méthodologique de réalisation d'une ACP	106
II.1.1 La matrice centrée-réduite	106
II.1.2 La matrice des covariances	107
II.1.3 L'analyse des axes.....	107
II.2 Exemple d'application.....	112
II.2.1 La matrice des coefficients de corrélation des variables	113
II.2.2 Le choix du nombre d'axes	114
II.2.3 Observation des variables	114
II.2.4 Observations des individus	116
II.3 Projection	118
III. L'analyse multicritères.....	121
III.1 Démarche méthodologique générale d'une AMC	123
III.1.1 La notion d'action	124
III.1.2 La notion de critère	126
III.1.3 La notion de tableau des performances	126
III.1.4 La notion d'agrégation.....	126
III.2 Projection autour de l'évaluation des gisements de déchets et des scénarios de gestion de déchets.....	128
IV. Conclusion	130

I. Introduction

Au travers d'un bref historique des outils d'analyses, nous présentons leur évolution au cours des 30 dernières années. Cet historique permet de mieux cibler les notions clés nécessaires à une bonne gestion des déchets notamment autour des questions de gisements, d'implantation et de gestion.

Avant les années 80, les modèles établis n'étaient optimum que pour une période à court terme car ne proposant qu'une seule alternative de gestion, et ce partant d'une seule source de production de déchets... L'expérience de ces années a fait évoluer les visions en considérant que les modèles de gestion des déchets devaient avant tout refléter une réalité qui s'imposait d'elle-même à savoir la vision d'un système. Dès lors, les éléments devraient être observés non plus dans leur individualité mais dans leur globalité, chacun en interaction avec les autres (MacDonald, 1996a). Cette vision du système continua d'évoluer avec l'intégration de nouvelles notions dans les modèles à commencer par les comportements sociaux face au tri, et ce, outre l'aspect économique qui était jusque-là le critère prédominant. Puis au cours des années 90, les notions de prévention et de réduction mais aussi de gestion intégrée (ISWM) apparaissent dans les nouveaux modèles en associant aspects économiques et environnementaux. (ERRA, 1999; Gabola, 1999; Kowalewski et al., 1999; Berger et al., 1999; Clift et al., 2000). C'est à ce moment que l'analyse du cycle de vie des produits a été réellement considérée et implantée dans les nouvelles technologies. (Barton et al., 1996; Bjorklund et al., 1999; Warmer Bulletin, 2000; Finnveden, 1999; Powell, 2000; McDougall et al., 2001; Harrison et al., 2001; EPIC and CSR, 2000). Enfin durant les années 2000, une nouvelle vision s'émancipe dans une prise de conscience généralisée celle de créer des systèmes de gestion des déchets durable à long terme en combinant les trois fondamentaux du développement durable (Petts, 2000).

Un certain nombre d'outils peuvent être énoncés comme l'analyse coûts-bénéfices, l'Analyse de cycle de vie (ACV), l'AMC qui s'ajoutent aux analyses statistiques classiques. Parmi toutes ces approches, l'analyse coûts-bénéfices n'est pas la méthode la plus pertinente et optimale pour évaluer les scénarios de gestion des déchets. En effet, cette méthode ne prend en compte que les aspects financiers des modèles donc selon une approche unidimensionnelle (Carbone, 2000). L'ACV est une méthode normée orientée essentiellement sur les aspects environnementaux basée sur des données qui, pendant longtemps, étaient difficilement mesurables. De plus, cette méthode nécessite d'avoir une base de données détaillées pas toujours accessible et des logiciels performants adaptés aux modèles étudiés. Enfin l'AMC est souvent utilisée de par sa flexibilité et sa facilité de mise en place permettant ainsi une grande possibilité d'alternatives par l'intermédiaire de critères d'évaluation. D'autres outils mathématiques peuvent être cités comme les Transformés de Laplace, de Hankel, de Fourier, les outils d'analyses vectorielle et matricielle, les développements dans les espaces propres, ou autres espaces mathématiques tel que les coniques dans la résolution des équations biharmoniques, les fonctions potentielles, etc... (Gatina, 2004). Au sein du laboratoire PIMENT, d'autres outils ont été ainsi explorés comme par exemple :

- Des Outils d'analyse statistiques élaborés en vue de la caractérisation de bases de données (ACP, logique floue, chaîne de Markov, techniques Bayésienne)
- Des Outils d'analyse de sensibilité paramétrique (méthode FAST, TMA, etc...)
- Les réseaux de neurones associés à des outils d'analyse.
- Les algorithmes génétiques appliqués à la caractérisation des paramètres.

Notre choix s'est porté sur l'analyse multicritères pour l'évaluation de nos scénarii de gestion des déchets. Afin de rester fidèle à notre vision de conformité et de reproductibilité, nous avons souhaité calibrer notre outil sur des critères couramment utilisés et retrouvés dans d'autres types d'analyses d'évaluation comme le bilan carbone pour l'aspect environnement ou encore l'analyse des coûts et des recettes à l'image de l'analyse coûts-bénéfices pour l'aspect économique. Le point III développe la méthode d'AMC et décrit les paramètres retenus pour notre étude.

Mais avant de présenter cet outil, d'autres analyses dites statistiques nous ont paru intéressantes à développer notamment l'analyse en composante principale (ACP). Cette analyse permet d'avoir une vue d'ensemble graphique d'un panel de données qui du fait de leur nombre ne pouvaient être représentées globalement par d'autres moyens. C'est au travers de cet outil que nous avons choisi d'évaluer notre propre base de données au vu de la diversité des flux et des quantités de déchets produits. C'est par conséquent dans ce chapitre que nous présentons les outils d'analyses (ACP et AMC) que nous avons choisi d'exploiter pour mener à bien nos applications au sujet d'étude avant même de présenter la méthode de simulation (Cf. chapitre 2). Tout simplement, la connaissance autour des outils d'analyse à disposition nous donne accès à des indications sur la nature des solutions qui seront mises en évidence (Gatina, 2004). L'étude des outils d'analyse avant même d'effectuer l'étude permet d'identifier un certain nombre de paramètres à considérer et de ce fait d'éliminer toutes démarches empiriques en reposant stratégiquement sur des bases mathématiques bien construites. De plus, face à une approche systémique la mise en œuvre d'outils d'analyse adaptés est primordiale.

II. L'Analyse en composante principale (ACP)

L'ACP fait partie de la famille des outils d'analyses factorielles. Outre l'ACP, cette famille d'outils comprend plusieurs développements dans le champ des études statistiques : l'analyse Factorielle des Correspondances (AFC), l'Analyse des Correspondances Multiples (ACM), l'Analyse Factorielle Discriminante (AFD) et l'Analyse Canonique. Les différences entre ces méthodes sont principalement le types de données à analyser, à savoir que les analyses des Correspondances utilisent des données strictement qualitatives à l'inverse de l'ACP par exemple qui utilise des données quantitatives. Une analyse factorielle correspond à une méthode statistique descriptive multidimensionnelle dite non-probabiliste car il n'est pas nécessaire qu'elle repose sur une distribution selon une loi normale (Baccini, 2010).

Les méthodes factorielles font parties des méthodes statistiques descriptives multidimensionnelles les plus classiques. Elles s'appuient sur la recherche de facteurs en nombre restreint et résumant le mieux possible les données considérées (Baccini, 2010). Elles reposent sur des aspects géométriques et des représentations graphiques des nuages de points ou diagrammes de dispersion et permettent le traitement simultané de plusieurs variables (Duby, 2006 ; Baccini, 2010). Comme précisé, ces méthodes sont purement descriptives et s'appuient par conséquent essentiellement sur des représentations graphiques. La notion d'ACP a été introduite pour la première fois en 1901 par Karl Pearson (Pearson, 1901) et performée par la suite par Hotelling durant les années 30 et développée au travers d'outils statistiques par Benzécri pendant les années 60 (Benzécri, 1973 et Benzécri, 1984). Le but premier de la mise en œuvre d'une telle méthode était de pouvoir traiter un grand nombre de données afin de les visualiser et d'en hiérarchiser le contenu.

L'ACP a donc pour fonction l'étude de plusieurs variables quantitatives (plus de deux) simultanément, ne serait-ce que pour obtenir une représentation graphique globale des données. En effet, lorsque le nombre de variables est supérieur à deux, nous ne nous situons plus dans un plan à deux dimensions mais dans un espace à x dimensions équivalent au nombre de variables. L'ACP a donc pour objectif de revenir à un espace propre réduit en général à deux dimensions en restant le plus fidèle à la réalité. Il s'agit donc d'aboutir à une photographie la plus représentative et pertinentes des données de base. C'est notamment par la réalisation d'une matrice des variances-covariances ou encore par la matrice des corrélations que l'ACP opère. Ce sont ces matrices qui vont permettre d'effectuer la photographie « résumée » des données considérées au travers de la prise en compte de leur dispersion au sein du nuage de points. « Elle remplace un tableau de nombres difficile à analyser (x variables à p dimensions) par une série de tableaux plus simples qui sont une bonne approximation de celui-ci » (Cibois, 2006). Il s'agit de mettre en évidence des facteurs en nombre réduits donc de plus petite dimension, plus faciles à analyser et malgré tout significative de la configuration initiale des données.

Il nous est donc apparu judicieux de mettre en œuvre une telle technique d'analyse avec pour but l'identification de « résultats cachés » au cœur des données dans un objectif de quantifier le gisement de biodéchets à la Réunion. Ce qui est intéressant dans cette approche, c'est de mettre l'accent sur des résultats inattendus ou au contraire confirmant certaines idées préétablies. Cette quantification du gisement a permis la création d'une base de données composées de 15 variables liées aux différents flux de biodéchets considérés. Ne sachant comment interpréter et représenter ces données, la connaissance préalable des outils d'analyses et par conséquent l'ACP fut un moteur dans nos recherches. De plus, l'application de cette méthode a favorisé la mise en route de tout un questionnement notamment autour des éventuelles corrélations existantes entre les flux de déchets et ainsi clarifier le sens des données pour en optimiser leur lisibilité. Nous nous attachons à décrire dans un premier temps la méthode mathématique de l'ACP et dans un deuxième temps nous rattacherons de manière plus précise l'outil à l'application pour passer de la théorie à la pratique.

II.1 Démarche méthodologique de réalisation d'une ACP

L'ACP peut être élaborée en s'appuyant sur une approche purement statistique permettant des interprétations basées sur des observations pratiques. Elle peut être également élaborée à partir de raisonnements mathématiques plus théoriques basés sur l'Analyse matricielle et plus particulièrement sur les notions de valeurs propres, vecteurs propres et bases propres. Nous nous situons dans le cadre de la première approche qui nous permet de construire une démarche en restant dans le "réel".

Le problème se définit comme suit : soit un jeu de données de p variables quantitatives réelles X^j observées sur n individus i affectés de poids w_i . Ces données sont classées dans une matrice X à dimensions $(n \times p)$ où chaque variable $X_j = (X_{1,p}, \dots, X_{n,p})$ a une moyenne $\bar{x}_p$ et un écart type σ_{Xj} .

$$X = \begin{bmatrix} x_1^1 & x_1^j & x_1^p \\ x_i^1 & x_i^j & x_i^p \\ x_n^1 & x_n^j & x_n^p \end{bmatrix}$$

Les poids attribués sont représentés par une matrice diagonale D de taille k :

$$D = \begin{bmatrix} w_1 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & w_k \end{bmatrix}$$

Si les poids sont égaux, $D = \frac{1}{k} I$,

Avec, I la matrice identité :

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La méthode de l'ACP se découpe en trois étapes :

- 1) La matrice X doit être centrée et réduite afin de rendre les données soient comparables entre elles surtout en présence d'unité de mesures différentes, on obtient alors une nouvelle matrice $\bar{X}$,
- 2) La matrice $\bar{X}$ est transformée en matrice de covariance S ,
- 3) Et la détermination des axes de projection.

II.1.1 La matrice centrée-réduite

A ce stade, nous souhaitons représenter les individus et les variables graphiquement sur un espace plan R^p . Pour cela, il est nécessaire de déterminer une nouvelle origine qui sera le centre de gravité du nuage de point g . On obtient donc une nouvelle matrice centrée $\bar{X}$ où g correspond à la matrice des moyennes $\bar{x}_p$:

$$\bar{X} = \begin{bmatrix} x_{1,1} - \bar{x}_1 & \dots & x_{1,p} - \bar{x}_p \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n,1} - \bar{x}_1 & \dots & x_{n,p} - \bar{x}_p \end{bmatrix} = X - g$$

La matrice est réduite en divisant la matrice centrée $\bar{X}$ par son écart type σ_{Xj} :

$$\tilde{X} = \begin{bmatrix} \frac{x_{1,1} - \bar{x}_1}{\sigma_{X1}} & \dots & \frac{x_{1,p} - \bar{x}_p}{\sigma_{Xp}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{x_{n,1} - \bar{x}_1}{\sigma_{X1}} & \dots & \frac{x_{n,1} - \bar{x}_p}{\sigma_{Xp}} \end{bmatrix}$$

Une fois, les données centrées et réduites, il est nécessaire de déterminer les matrices des covariances ou des corrélations.

II.1.2 **La matrice des covariances**

Afin d'étudier la présence d'une relation entre variables, on étudie les covariances ou encore les corrélations des données de la matrice afin d'observer leur dispersion. Ce sont ces analyses de la covariance et des coefficients de corrélation qui permettent de visualiser la façon dont varient et évoluent simultanément les variables. On parle alors d'indice de liaison. Les matrices $\bar{X}$ et $\tilde{X}$ sont multipliées par leurs transposées $\bar{X}'$ et $\tilde{X}'$ afin d'obtenir respectivement la matrice des covariances S et la matrice des corrélations R :

$$C = cov(X) = \frac{1}{n-1} \bar{X}\bar{X}'$$

$$cor(\tilde{X}) = \frac{1}{n-1} \tilde{X}\tilde{X}'$$

$$S = \bar{X}\bar{X}'D$$

$$R = \tilde{X}\tilde{X}'D$$

Avec,

$$\tilde{X} = \bar{X} D_{1/s}$$

Où, $D_{1/s}$, la matrice diagonale des inverses des écarts-types et $D_{1/s}^2$, la matrice diagonale des inverses des variances :

$$D_{1/s} = \begin{bmatrix} 1/s_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 1/s_p \end{bmatrix}$$

De la matrice des corrélations, les vecteurs propres et les valeurs propres peuvent être extraites afin de déterminer les axes principaux du plan sur lequel sont projetées les données.

II.1.3 **L'analyse des axes**

Prenons comme exemple un photographe qui cherche le meilleur angle de vue pour immortaliser un moment de la vie quotidienne. Le photographe doit donc choisir l'angle de vue qui représentera au mieux la scène autrement dit qui retiendra le maximum d'informations (la luminosité, les couleurs, les sentiments des personnages...) à un instant t (Baccini, 2010). L'ACP se substitue dans ce cas à l'œil du photographe cherchant le meilleur angle de vue et se traduisant par des facteurs ou encore des composantes principales (Tableau 7). La méthode de projection est très développée dans la littérature (Mareschal 1988, Briggs 1990, Besse, 2014).

Tableau 7 : Analogie entre le photographe et l'ACP

Photographe (œil)	ACP (méthode mathématique)
Angle de vue (prise de la photo)	Composantes principales ou facteurs

L'objectif est que les premières composantes représentent le niveau le plus élevé d'informations des variables d'origines en générales 2 afin de réduire la dimension du jeu de données.

$$C^1 = a_1^1 X^1 + a_1^2 X^2 + \dots + a_1^p X^p$$

$$C^2 = a_2^1 X^1 + a_2^2 X^2 + \dots + a_2^p X^p$$

...

Soit,

$$C^1 = \sum_{j=1}^p a_1^j X_j = a_1^T x = z_1$$

$$C^2 = \sum_{j=1}^p a_2^j X_j = a_2^T x = z_2$$

...

Soit pour les k composantes principales,

$$a_k^T x = z_k$$

Avec,

a_j^j , le vecteur propre de la matrice de covariance S

Il est important de noter que C^1 et C^2 sont des fonctions linéaires non corrélées entre elles des variables d'origines afin que les informations portées par C^2 soient complètement nouvelles et complémentaires de celles de C^1 (Baccini, 2010).

Au final, nous voulons obtenir une projection du nuage de point de la matrice X sur un vecteur u de manière à ce que la variance soit maximale :

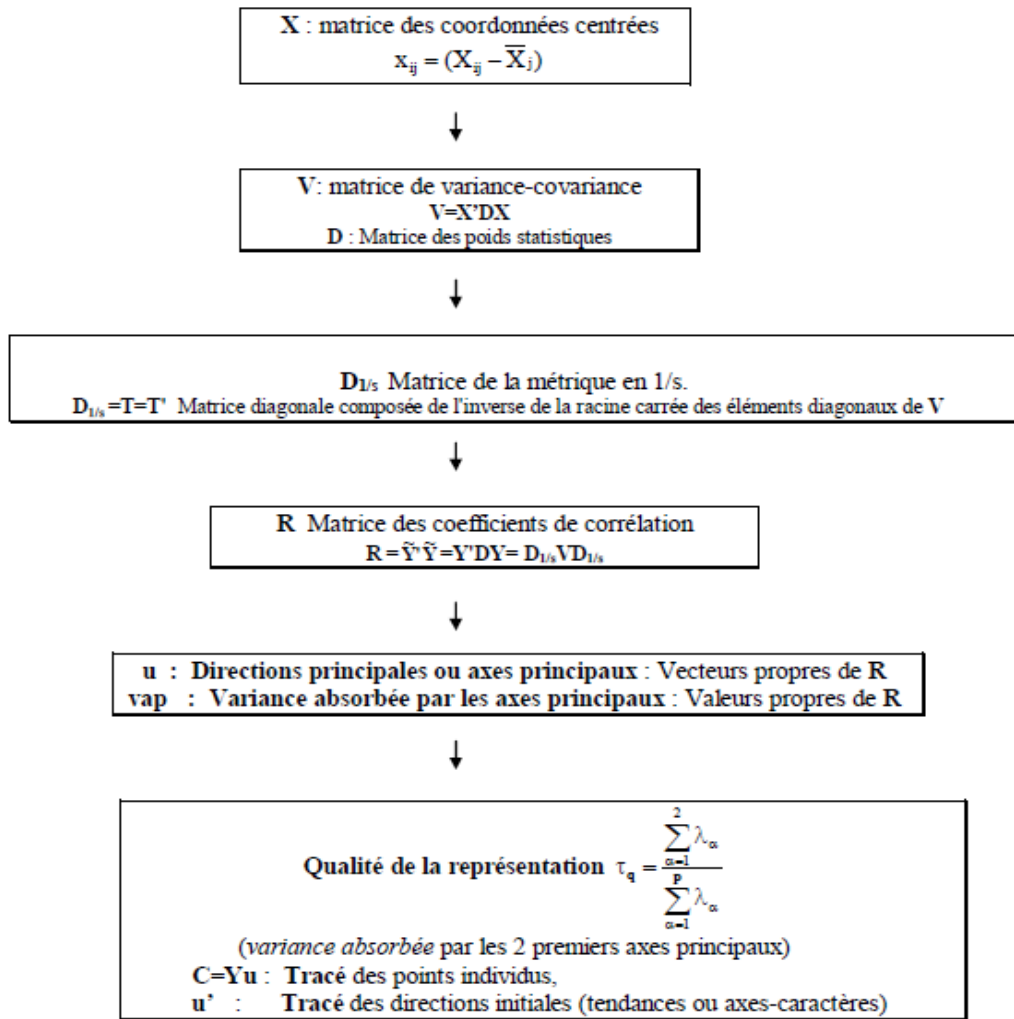
$$\pi_u(X) = X \times u$$

Avec la variance empirique de $\pi_u(X)$:

$$\pi_u(X)' \times \frac{1}{n-1} \pi_u(X) = u' C u$$

On obtient la projection par une fonction de Lagrange en maximisant la variance des données projetées sur u comme suit :

$$L(u, \lambda) = u' C u - \lambda (u' u - 1)$$



N.B. La distance entre 2 points M_i et M_j dans R^p est :

$$d^2(i, i') = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^p (x_{ik} - x_{i'k})^2 / s_k^2$$

Figure 26 : Méthode générale de réalisation d'ACP (source : Raynaud, 2009)

Pour ce faire, les variances des composantes principales doivent être maximisées afin de garantir que les premières composantes contiennent le maximum d'informations des variables d'origine. La variance est déterminée comme suit (Cano-Orellana, Delgado-Cabeza ; 2015) :

$$var(z_1) = \sum \frac{Z_{1i}}{n} = \left(\frac{1}{n}\right) z_1' z_1 = \left(\frac{1}{n}\right) u_1' X' X u_1 = u_1' \left(\left(\frac{1}{n}\right) X' X\right) u_1$$

$$var(z_k) = u_k' S = \lambda_k$$

Avec,

u_i , le vecteur propre de C associé à la valeur propre maximale λ_k ,

λ_k , la k ème valeur propre ou variance maximale pour la k ème composante principale ou axe. λ_1 et λ_2 donnent la valeur de la variance expliquée par les deux axes factoriels choisis sur le plan principal et les axes factoriels sont générés par les deux vecteurs propres correspondant à ces valeurs propres (Raynaud, 2009). La mesure de la quantité d'information, soit le taux de variance δ retenue et représentée par la composante principale peut se définir comme suit (Cano-Orellana, Delgado-Cabeza ; 2015) :

$$\delta = \frac{(\lambda_1 - \lambda_2)}{\sum_{j=1}^k \lambda_j}$$

En général, le score obtenu se situe entre 60 et 90% (sharma 1996 ; Brans, 1994)

Plus le pourcentage obtenu est élevée plus la représentation du nuage de point est proche du jeu de données initiale. Autrement dit, $x\%$ de la variance sont expliqués par les deux premiers axes factoriels choisis.

La Figure 26 résume la méthodologie approchée dans la mise en œuvre d'une ACP.

Tableau 8 : Présentations de quelques logiciels d'ACP

Logiciels	Contexte	Options ou particularités	Références
ade4	Fonctions d'Analyse de Données destinées d'abord à la manipulation des données Écologiques et Environnementales avec des procédures Exploratoires d'essence Euclidienne	Package du logiciel R	Laboratoire de Biométrie et Biologie Évolutive (UMR 5558) de l'Université Lyon 1
R	Logiciel de statistiques englobant tous types d'analyses statistiques sous forme de langage de programmation	logiciel gratuit et à code source ouvert et multiplateformes très performant	Laboratoire Bell
SPSS	Logiciel de statistiques englobant tous types d'analyses statistiques	Logiciel libre	SPSS Inc
Excel STAT	le logiciel d'analyse de données et de statistiques	Logiciel de bureautique	Microsoft
STATMANIA	Outil de méthodes d'analyses statistiques de données d'enquêtes, de questionnaires internet	Utilisation de méthodes innovantes comme la matrice importance/satisfaction	Soft concept
TANAGRA	DATA MINING destiné à l'enseignement et à la recherche	Plateforme d'expérimentation	Ricco Rakotomalala (universitaire)
SPAD	Logiciel destiné au Data Mining et à l'analyse prédictive à proposer une interface totalement graphique	70 méthodologies pour extraire des informations stratégiques pour la prise de décision	COHERIS (commercial)

II.2 Exemple d'application

Beaucoup de logiciel d'ACP sont très développés dans les laboratoires d'écologie (CANOCO, TWIN SPAN, ade4...) de ce fait du nombre importants d'expérimentations nécessitant de puissants outils d'analyses statistiques. Ces études sont diverses comme l'étude des populations avec des notions d'évolution, de croissance, d'eutrophisation, d'alimentation...

Le Tableau 8 présente succinctement les logiciels appliqués à ce domaine. Outre les logiciels existants, il semble intéressant de développer ici, un exemple d'application de l'ACP afin de cerner de manière plus pratique cet outil d'analyse statistique. Il nous est d'ores et déjà possible de constater que l'ACP est utilisée dans divers domaines parfois très éloignés mais toujours dans un même objectif de mettre en lumière ce qui ne nous est pas visible à œil nu. C'est donc à travers cette méthode que certains éléments alors cachés nous apparaissent alors clairement notamment autour de la mise en évidence de profils, de typologie et de comportements des variables et des individus.

A l'heure actuelle, l'ACP est très utilisée pour l'analyse statistique d'enquête ou encore pour évaluer les notes d'élèves et ainsi élaborer des profils. Il est important de préciser que notre choix c'est naturellement porté sur l'ACP car elle constitue la base fondamentale de toutes méthodes statistiques descriptives multidimensionnelles et donc des méthodes factorielles. Le cœur même d'une ACP est purement mathématique avec des notions de matrices et d'éléments propres mais outre ce fait la compréhension de mise en œuvre et d'interprétation des résultats restent accessible à tous ce qui constitue à notre avis une raison supplémentaire au choix de cette méthode.

Afin d'illustrer le principe de l'ACP, nous considérons les notes de 12 élèves d'une classe de terminale pour les matières de français, de mathématiques, d'anglais et de physique. L'analyse de ces notes, nous permet à terme d'établir le profil des élèves (Tableau 9).

Tableau 9 : Notes des élèves par matières

Élèves	Français	Mathématiques	Histoire	Physiques
A	10	10	11	8
B	15	13	12	14
C	8	8	10	8
D	9	9	12	9
E	19	16	15	18
F	18	4	15	3
G	14	12	14	14
H	5	6	6	6
I	14	5	14	5
J	8	8	10	8
K	2	4	2	3
L	1	3	4	4

Pour ce faire, nous considérons 4 variables représentées par les matières et 12 individus représentés par les élèves. En temps normal, pour l'analyse de ces données un graphique de type nuage ou histogramme ou encore des résumés numérique auraient pu être conduit pour la comparaison de deux variables. Et dans le cas d'une analyse plus poussée, les coefficients de corrélation linéaire ou encore le calcul de la droite de régression aurait permis de réaliser une comparaison à deux variables afin d'en extraire des similitudes de comportements. Autrement dit, il s'agit de comparer les notes d'un élève en français et en mathématiques afin d'identifier ses points forts ou au contraire ses faiblesses. C'est alors qu'intervient l'ACP en permettant de répondre à l'interrogation « mais comment faire pour observer simultanément ces 4 variables et ce sur un même graphique ».

Cet exemple, nous permet d'illustrer ces propos. Pour la réalisation de cet exemple et de notre étude de cas présentées au chapitre 4, nous nous sommes appuyés sur le logiciel XL stat. La conduite d'une ACP se déroule par la présentation :

- 1) des statistiques simples autour des variables;
- 2) la matrice des coefficients de corrélation ;
- 3) la matrice des variances-covariances ;
- 4) les valeurs propres et enfin les représentations des variables et des individus.

Afin d'entrer dans le vif du sujet, nous ne présentons ici que les coefficients de corrélation et les représentations des variables et des individus (l'ensemble de la méthode sera développée dans notre cas d'étude). Nous avons donc choisi de nous concentrer sur les représentations graphiques afin de s'approprier la méthode d'interprétation, celle-ci pouvant être délicate puisqu'il s'agit d'une méthode descriptive basée sur l'analyse de graphiques. La suite des paragraphes présente les résultats obtenus pour cet exemple et leurs analyses.

II.2.1 **La matrice des coefficients de corrélation des variables**

La matrice de corrélation (Tableau 10) montre qu'il existe des corrélations fortes entre le français et les mathématiques de l'ordre de 0,938 et un lien un peu plus fort entre les mathématiques et la physique de l'ordre 0,977. Ces corrélations expliquent que lorsque l'une des deux matières corrélée évolue ou augmente plus elle va influencer l'autre matière dans le même sens. On parle alors de corrélation positive.

Tableau 10 : Matrice des corrélations

Variables	Français	Mathématiques	Histoire	Physiques
Français	1	0,591	0,938	0,570
Mathématiques	0,591	1	0,559	0,977
Histoire	0,938	0,559	1	0,535
Physiques	0,570	0,977	0,535	1

A l'inverse, les corrélations existantes entre le français, la physique et les mathématiques sont d'ordre plus faible respectivement de 0,570 à 0,591. Il en est de même pour l'histoire, la physique et les mathématiques avec des ordres de grandeur allant de 0,559 à 0,535. Plus la corrélation est forte plus elle s'approche de 1 et plus elle est faible plus elle sera nulle, proche de 0.

II.2.2 Le choix du nombre d'axes

Ce choix s'effectue au regard des valeurs propres. Le premier axe (F1) permet d'expliquer 77,13% de la variance totale du nuage de point et le deuxième axe permet d'expliquer à hauteur de 20,77% cette même variance (Tableau 11). Donc si on projette les individus sur un plan à deux dimensions en considérant les axes F1 et F2, leur variance totale est expliquée à 90,90%. La représentation graphique obtenue est donc de bonne qualité et est surtout représentative de la réalité c'est à dire du jeu de données initial.

Tableau 11 : Les valeurs propres

	F1	F2	F3	F4
Valeur propre	3,085	0,831	0,061	0,023
Variabilité (%)	77,133	20,767	1,535	0,565
% cumulé	77,133	97,900	99,435	100,000

II.2.3 Observation des variables

L'observation des variables consiste à analyser la répartition des variables à savoir les matières toujours sur les axes F1 et F2 (Figure 27). A première vue, le français et l'histoire géographique sont corrélés négativement avec les mathématiques et la physique. Une première conclusion peut donc se faire à ce niveau, à savoir que les matières littéraires s'opposent aux matières scientifiques. Autrement, l'observation des matières scientifiques montrent une corrélation quasi parfaite entre elle (quasi superposition). Elles sont donc corrélées positivement traduisant un lien très fort. De plus, les points de ces matières touchent le cercle du graphique ce qui signifie qu'elles ont une très bonne représentation. Il en est de même pour les matières littéraires qui montrent une représentation de bonne qualité (touche le cercle du graphique) avec également une forte corrélation de ces matières.

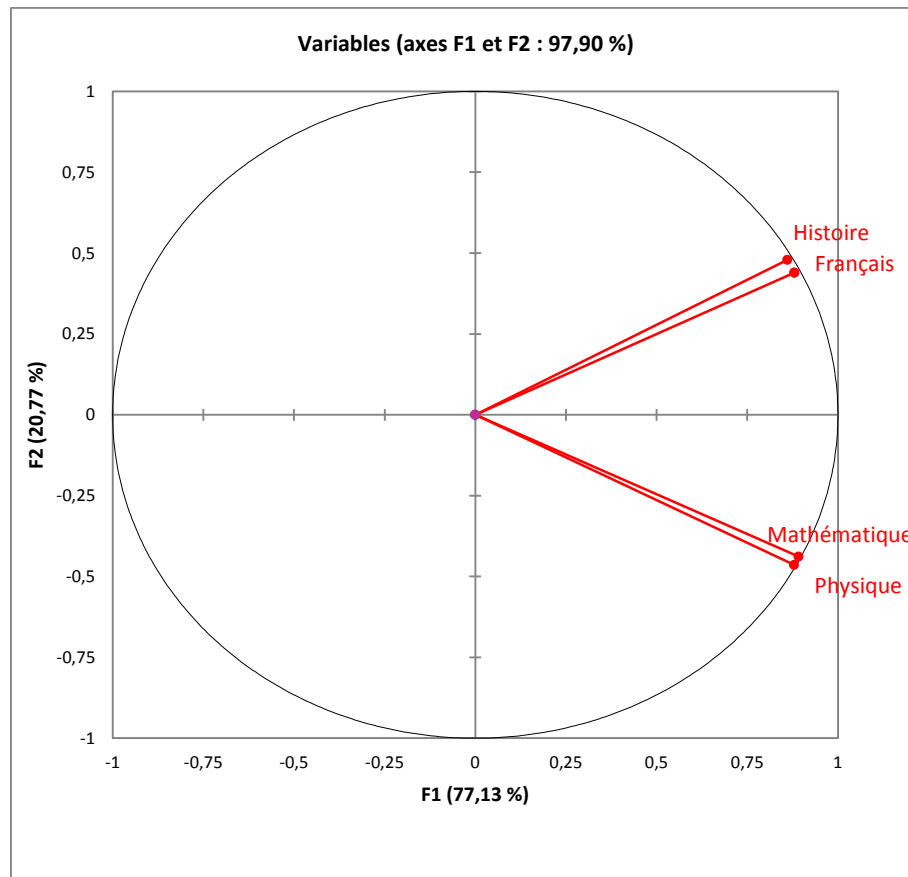


Figure 27: La répartition des variables

Toute fois pour être précis, il peut être dit que cette corrélation est moins forte que celle des matières scientifiques. En reprenant la matrice des corrélations, on obtient effectivement cette confirmation avec respectivement 0,938 pour les matières littéraires et 0,977 pour les matières scientifiques.

Si l'on observe les autres élèves, nous pouvons constater qu'ils sont répartis le long de l'axe F2 avec une majorité entre eux plus ou moins centrés sur cet axe. Il peut donc en être déduit que l'axe F2 constitue les niveaux de moyennes allant de la meilleure à droite à la moins bonne à gauche. L'élève primé par la meilleure moyenne est par conséquent l'élève E à l'inverse des élèves K et L qui sont les bons derniers.

En conclusion, sur l'axe F2 s'observe les niveaux entre les élèves (du meilleur au moins bon) et sur l'axe F1 s'observe les profils d'élèves selon leur affinité pour les matières scientifique ou littéraire.

Dans cette première observation des variables, nous pouvons retenir que la distance entre les points est importante à prendre en compte car elle traduit les liens et la force de corrélation. Plus les variables sont proches voir superposées plus la corrélation est forte et positive. A l'inverse lorsque les variables se positionnent dans des cadrans différents du graphique, elles sont corrélées négativement.

De ce fait, si des variables sont corrélées positivement cela signifie que leur évolution est proportionnelle. Par exemple, plus il y aura d'enseignement de français plus il y aura d'enseignement d'histoire et inversement. Dans le cas de

corrélation négative, il n'existe pas d'influence entre les matières si ce n'est que lorsqu'une matière évolue (par exemple est plus enseignée) l'autre diminue afin de maintenir un certain équilibre.

Il est également possible de conclure que l'axe F1 qui représente 90% du nuage de points considère les matières selon des profils d'élèves pouvant être littéraire ou plutôt scientifique. Les élèves qui seront orientés vers le haut du cercle (moitié supérieure) seront plutôt littéraires et à l'inverse les élèves positionnés en bas du cercle (moitié inférieure) seront plutôt scientifiques. Autrement dit, si on se déplace le long de l'axe F1, on fait varier les profils d'élèves selon leur sensibilité aux enseignements doux ou durs.

II.2.4 **Observations des individus**

L'observation des individus consiste à analyser la répartition des élèves sur un graphique à dimensions 2D sur les axes F1 et F2 (Figure 28). Le nuage de point des élèves est assez dispersé au sein du cercle. Il existe donc une certaine hétérogénéité des élèves (niveau différents). Prenons l'exemple de l'élève E. Cet élève se positionne dans la partie inférieure du cercle. Il peut donc être établi que son profil est plutôt scientifique tandis que les élèves I ou F ont plutôt des profils littéraires. De ce fait, les élèves moyens et « touche à tout » sont situés au centre du cercle autour des axes F1 et F2 comme les élèves C, A et D. Mais à l'image des I et F élèves, il est possible d'avoir une bonne moyenne sans pour autant être doué dans toutes les matières (profil très littéraire).

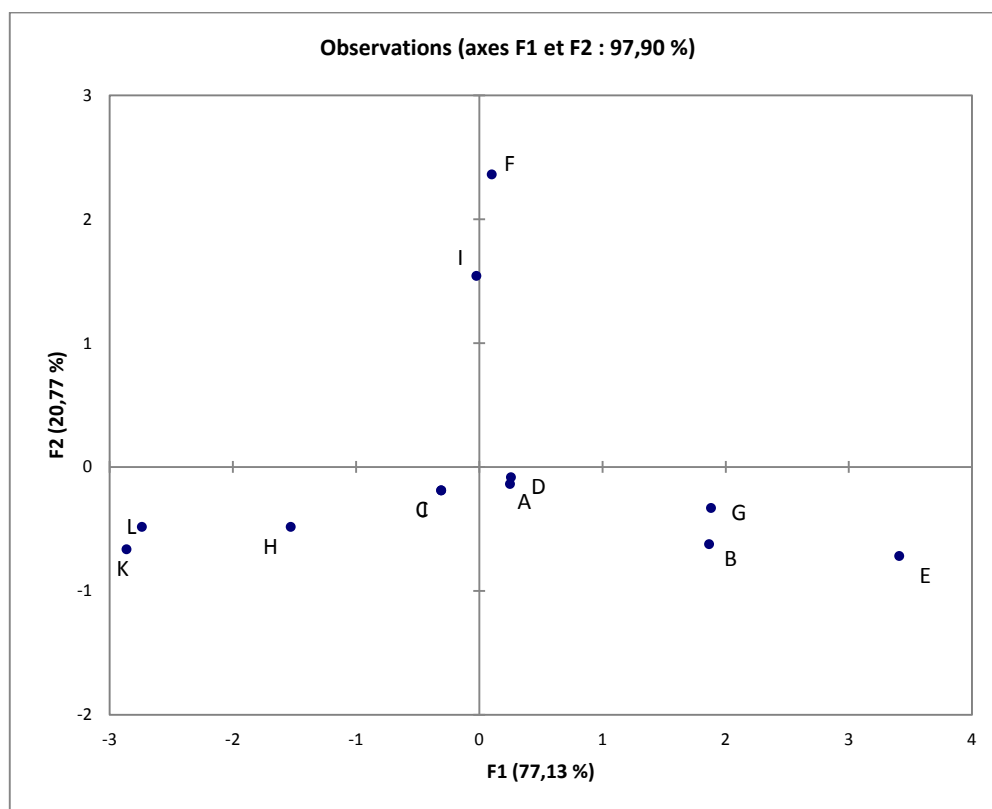


Figure 28 : La répartition des individus

Afin de confirmer ces observations graphiques, un retour aux données numériques est nécessaire notamment par l'analyse des contributions de chacun des axes (Tableau 12 et Tableau 13). Ces contributions reviennent à affecter des coefficients aux notes. Au lieu d'être déterminées par l'enseignant lors d'examen par exemple, c'est l'ACP qui leur en attribue afin de différencier aux mieux les élèves entre eux. La simple observation des chiffres, permet de confirmer nos affirmations avec par exemple l'élève E qui est fortement représenté par l'axe F1 à hauteur de 31% et à l'inverse l'élève F plutôt représenté par l'axe F2.

Tableau 12 : Contributions des variables (%)

	F1	F2
Français	25,119	23,270
Mathématiques	25,797	23,173
Histoire	24,007	27,647
Physiques	25,076	25,910

Tableau 13 : Contributions des individus (%)

	F1	F2
A	0,170	0,191
B	9,404	3,905
C	0,256	0,354
D	0,181	0,070
E	31,405	5,173
F	0,028	55,858
G	9,575	1,097
H	6,332	2,335
I	0,001	23,869
J	0,256	0,354
K	22,151	4,444
L	20,239	2,348

II.3 **Projection**

L'ACP est utilisée dans cette étude comme un outil facilitant l'interprétation des analyses et des résultats que nous cherchons à mettre en évidence concernant les caractéristiques des gisements de déchets au niveau des communes. Cet outil analytique permet l'observation des corrélations et des relations entre les individus et les variables considérés. Au cours de nos réflexions, il a été mis en avant un besoin de structurer la gestion des déchets à la Réunion. Pour ce faire, nous avons imaginé le traitement des données chiffrées par cette méthode afin d'en faire ressortir d'éventuels classements et groupes d'individus ou de variables ainsi que des corrélations entre variables et individus. Ces classements ont pour but de poser les bases de cette structuration.

A partir de cette structuration, plusieurs hypothèses peuvent être émises comme par exemple :

- Certaines communes présentent les mêmes compositions,
- Certaines communes présentent les mêmes comportements,
- Certains flux de déchets sont répartis de manière égale sur le territoire,
- Certains flux de déchets sont présents dans les mêmes communes
- Certaines communes ont par conséquent des corrélations positives avec d'autres communes du fait de leurs similitudes en flux de déchets...

Tout un panel d'hypothèses peut être ainsi formulé au travers de cet outil. Le point important de cette approche est par conséquent de bien appréhender les besoins de départ. Notre but au terme de cette étude est de pouvoir proposer et faciliter la prise de décision autour de la mise en place de scénarios de gestion des déchets.

L'analyse des scénarios nécessite une interprétation des données, l'ACP est un bon moyen purement descriptif pour décoder et exploiter ces données qui peuvent être nombreuses. Dans un scénario plusieurs aspects sont pris en compte dans l'analyse et la prise de décision : l'environnement, l'économie et le social. Mais avant d'observer ces paramètres, le facteur clé se trouve être les volumes : quels sont les types de déchets, quelles sont les quantités générées par unité de temps (jours, semaines, mois ou années). C'est sur cet aspect quantitatif que sera utilisée l'ACP avec pour objectif d'examiner les comportements et donc les profils existant entre communes, flux générés et volumes.

Un certain nombre de flux de déchets organiques ont donc été identifiés et quantifiés précédemment. Par conséquent un nombre important d'informations sur le volume du gisement mais aussi sur sa répartition spatiale ont été collectés. A cette fin, nous souhaiterions déterminer d'éventuelles corrélations entre communes.

Deux questions attirent notre attention à savoir : i) Est-ce que certaines communes présentent des comportements similaires en termes de composition et de tonnages permettant d'établir une typologie de communes ? ii) Et si oui, quels scénarios de gestion sont à mettre en place, pour quelles communes ?

Si deux communes présentent le même profil, elles peuvent donc dans l'absolu être gérées de la même manière. Une typologie 1 sera associée à un ou plusieurs

scénarios qui s'appliqueront à toutes les communes du groupe 1 et ainsi de suite. De ce fait, l'île ne sera plus gérée par un système de gestion des déchets généralisé mais par plusieurs petits systèmes de gestions adaptés aux volumes, aux flux et aux communes. De plus, s'il s'avère que certaines communes de même typologie sont proches ou faisant partie de la même EPCI, elles pourront mutualiser leurs équipements et leur gestion des flux.

Pour ce faire, nous disposons d'une base de données relatant les tonnages produits dans chacune des communes et pour chaque flux de déchets. Cette base de données est issue d'une méthodologie que nous avons mise au point et adaptée au contexte local. Cette méthodologie fera l'objet du premier titre du chapitre 3 afin de présenter la démarche d'acquisition des données et des résultats obtenus. Il est possible à ce stade de visualiser cette base de données comme une matrice de dimension 15 × 24. En effet, nous avons identifiés 15 variables représentées par les flux de biodéchets et 24 individus correspondant aux communes de l'île. Les communes constituent les lignes de la matrice tandis que les flux de biodéchets sont représentés en colonne.

Dans un objectif de clarification, les biodéchets ont été classés selon leurs origines afin de les ordonner au vu de leur nombre, à savoir les biodéchets ménagers et des collectivités, les biodéchets d'origine agricole et les biodéchets industriels. Le Tableau 14 et le Tableau 15 présentent la liste des variables et des individus considérés pour l'étude des corrélations.

Tableau 14 : Présentation des variables

Variables : Flux de biodéchets	
<u>Biodéchets ménagers</u>	
FFOM	
Déchets verts	
Boues des STEP	
Biodéchets des restaurations collectives scolaire	
(écoles primaires, collèges et lycées)	
Biodéchets restauration traditionnelle, rapide et hospitalière)	
Biodéchets des marchés forains	
<u>Biodéchets agricoles</u>	
Effluents d'élevages	
Résidus de paille de canne à sucre	
<u>Biodéchets industriels</u>	
Des grandes et moyennes surfaces	
Des commerces de gros et de détails	
Des industries agroalimentaires	

Tableau 15 : Présentation des individus

Individus : Communes			
Région Nord	Région Est	Région Sud	Région Ouest
Saint-Denis Sainte-Marie Sainte-Suzanne	Bras-Panon La Plaine-des-Palmistes Saint-André Saint-Benoît Sainte-Rose Salazie	Avirons Entre-Deux L'Étang-Salé Petite-Île Saint-Joseph Saint-Louis Saint-Pierre Saint-Philippe Le Tampon Cilaos	Saint-Leu Le Port La Possession Saint-Paul Les Trois-Bassins

Pour effectuer un choix de biodéchets à analyser et à considérer dans notre étude, nous nous sommes basés sur le plan de prévention des déchets non dangereux de la Réunion (PPGDND, 2014). Ce plan établit une liste des déchets présents sur l'île et notamment de biodéchets. Nous avons donc croisé cette liste avec la littérature scientifique afin d'affiner notre sélection de biodéchets. Mais c'est dans une optique d'exhaustivité afin d'établir une base de données la plus précise possible que nous avons œuvré. C'est pour cela que nous nous sommes appuyés sur une nomenclature axée sur les sources et origines de production.

La matrice est par conséquent remplie par des données quantitatives représentant les tonnages calculés selon la méthodologie adoptée. Ces tonnages ont été rassemblés sous une même échelle d'observation, celle des communes. Ce choix s'est fait tout naturellement du fait des découpages administratifs de l'île. Les découpages administratifs les plus courants sont le département ou la région, les EPCI ou les communautés de communes ou encore les collectivités, les communes et les IRIS.

La Réunion est à la fois une région et un département. Pour notre étude sur le territoire réunionnais, cette échelle était donc déjà effective. Mais comme nous l'avons précisé plus haut, notre objectif est d'élaborer et de proposer une base de données exhaustive sur les biodéchets. De ce fait, l'observation d'un niveau inférieur était de rigueur. Actuellement la gestion des déchets s'effectue et s'organise au niveau territorial et au niveau des EPCI. A ce titre et ayant 5 EPCI sur l'île, il semble encore que ce niveau ne soit pas assez précis dans le cadre d'une analyse statistique poussée. Les communes de niveaux inférieurs sont plus nombreuses et offrent une vision plus détaillée de l'ensemble du territoire. Et enfin les IRIS, la dernière échelle d'observation et par conséquent la plus détaillée offre un aperçu très précis de la production des déchets sur le territoire.

C'est donc tout naturellement que cette échelle des IRIS, nous a intéressés, dans un premier temps. Notre base de données à donc été construite à partir de ces données à l'échelle de l'IRIS. Cela nous a permis d'obtenir une base exhaustive. Mais au vu de la dimension de la matrice collectée, il n'était pas simple d'en extraire des informations. Nous nous sommes aperçu que certaines données comme les effluents agricoles étaient difficiles à observer à cette échelle des IRIS. C'est

pourquoi dans ce souci d'exhaustivité et de création d'une base de données accessible et compréhensive, nous nous sommes arrêtés à l'échelle des communes. Puisque nous étudions le territoire réunionnais dans sa globalité, nous avons donc considéré l'ensemble des communes de l'île au nombre de 24.

Nous avons pu constater au fil de cette phase d'étude que l'ACP semblait être l'outil le plus approprié pour répondre à nos interrogations : existe-il des liens et des corrélations entre communes et flux de déchets ? Existe-il des tendances qui permettraient de regrouper les communes et ainsi de mettre en évidence des typologies ? C'est en croisant les données (les tonnages) obtenues des différents flux avec les différentes communes que l'ACP évalue les distances entre les variables et les individus à l'aide de lois de corrélation.

C'est l'évaluation des distances entre les points du nuage qui permet la proposition de composantes principales. Ce sont ces composantes principales qui emmagasinent l'information issue des calculs de distances afin de photographier à un instant t le nuage de points. Le nuage de points étant la projection sur un plan à x dimensions les individus et les variables. Nous avons 15 variables à étudier, l'ACP propose donc 15 composantes principales.

Il est important de visualiser une composante principale comme un photographe qui photographie sous 15 angles différents le nuage de points. Ces composantes doivent à chaque fois retranscrire un maximum d'informations de l'environnement réel observé. L'objectif est de combiner les composantes, en général les deux premières de manière à atteindre un maximum de retranscription avoisinant 100%. Une ACP correcte permet une retranscription des informations sur deux dimensions entre 70 et 90%

Le développement du contexte d'utilisation et la finalité attendue seront plus longuement présentés dans le chapitre 4. Ce chapitre constitue un cas d'application à l'utilisation de l'ACP dans une démarche préparatoire et donc préalable à la constitution de scénarios de gestion.

III. L'analyse multicritères

Lorsqu'il s'agit de gestion des déchets, la principale difficulté rencontrée se trouve être la prise de décision par les acteurs concernés. Ils doivent en général faire face aux questionnements d'ordre sociaux, économiques mais aussi environnementaux. Pour cela, il est nécessaire de faire appel à des outils d'analyses complets permettant l'évaluation simultanée voir standardisée de ces trois facteurs. Comme précisé en introduction de ce chapitre plusieurs outils sont alors possibles selon le facteur ciblé comme :

- L'analyse coûts-bénéfices pour une analyse économique,
- L'analyse de cycle de vie (ACV) pour une analyse environnementale,
- Et l'Analyse MultiCritères (AMC) souvent retrouvée pour l'analyse sociale.

D'autres modèles existent comme l'évaluation des risques et des impacts environnementaux... Il ne s'agit pas ici de faire une liste exhaustive des méthodes

d'analyses mais identifier parmi celles-ci celle qui semble la plus appropriée à notre cas de figure. Au vu de la littérature (Banas, 2010 ; Bhzadian, 2010 ; Brans, 1998 ; Castro-Schez, 2013 ; Chen, 2011 ; El Hanandeh, 2010 ; Figuerira, 2005 ; Hendricks, 1992 ; Hermann, 2007 ; Hokkanen, 1997 ; Karagiannidis, 2009 ; Knoeri, 2011 ; Pavan, 2009 ; Pohekar, 2004 ; Radojevic, 1997 ; Vego, 2008 ; Vetschera, 1992 ; Vuk, 1991 ; Wang, 1994 ; Xi, 2010), l'AMC apparaît comme l'alternative la plus pertinente et judicieuse.

L'AMC a été introduite par Saaty au travers de l'analyse hiérarchique des procédés (AHP) (Saaty, 1980) et Roy par l'intermédiaire du développement d'une autre méthode, la méthode ELECTRE (Roy, 1993). Elle a été développée dans un objectif purement d'aide face à la difficulté de décision dans un contexte problématique. Comment prendre une décision en étant, en tout état de cause, conscient des enjeux. La prise de décision au-delà de l'aspect purement mathématique, est un réel processus, une réelle démarche nécessitant une bonne connaissance de la problématique de réponse à savoir prendre une mesure autour-d'un choix, d'un tri et encore d'un classement. Selon Roy, « L'aide à la décision est l'activité de celui qui, prenant appui sur des modèles clairement explicités mais non nécessairement complètement formalisés, aide à obtenir des éléments de réponses aux questions que se pose un intervenant dans le processus de décision, éléments concourant à éclairer la décision et normalement à prescrire, ou simplement à favoriser un comportement de nature à accroître la cohérence entre l'évolution du processus d'une part, les objectifs et le système de valeurs au service desquels cet intervenant se trouve placé d'autre part. » (Roy, 1985). Il est donc nécessaire d'identifier au préalable l'ensemble des alternatives sur lesquelles repose la prise de décision.

Par conséquent, l'AMC est utilisée pour permettre le classement de plusieurs alternatives de la plus favorable à la moins favorable et ainsi d'identifier les options les plus adaptées au problème posé. Dans notre cas, nous allons procéder en deux étapes. La première consiste à identifier les sites favorables à l'implantation d'une unité de traitement (classement des sites) et la deuxième de choisir l'alternative de gestion des déchets la plus optimale pour les sites identifiés dans l'étape 1 (objet du chapitre 5). La première phase consiste donc à choisir parmi plusieurs sites potentiels les meilleures options et dans une deuxième étape de proposer pour chacune de ces options les meilleurs scénarios de gestion en accord avec la productivité et la composition des flux dans un périmètre défini autour du site considéré.

Dans un projet de gestion des déchets, il est important de localiser les zones productrices. Mais dans un contexte d'insularité les zones productrices ne sont pas forcément aptes à accueillir des unités de traitements face aux contraintes urbaines. C'est pourquoi, nous avons choisi de proposer une méthodologie afin d'extraire les sites potentiellement aptes répondants aux contraintes juridiques et de les croiser avec les zones productrices en biodéchets. A ce stade, nous proposons une AMC afin de classer les sites favorables et ainsi de mettre en place des scénarios de gestion adaptés au contexte des sites considérés. Une fois les sites classés, nous effectuons une deuxième AMC afin de ranger les scénarios par site. En conclusion, nous obtenons pour un certain nombre de sites retenus, un

classement de scénarios de gestion des déchets. Il sera alors possible de prendre une décision face aux besoins des acteurs.

III.1 Démarche méthodologique générale d'une AMC

« L'analyse multicritères est une méthode qui permet d'orienter un choix sur la base de plusieurs critères communs. Cette méthode est essentiellement destinée à la compréhension et à la résolution de problèmes de décision. Elle est utilisée pour porter un jugement comparatif entre des projets ou des mesures hétérogènes. De ce fait, elle peut être utilisée dans une démarche d'évaluation. » (europa.eu, 2005).

Cette analyse dans sa forme originale permet d'identifier plusieurs alternatives (différents scénarios de gestion) traduit sous forme de critères d'évaluation. Ces critères sont choisis en fonction de leur importance au sein du modèle et des circonstances dans lesquelles le modèle est développé. Il est possible d'étoffer cette analyse par intégration d'autres méthodes au modèle comme l'analyse des risques et l'analyse des impacts environnementaux ou encore couplée aux outils SIG.

L'AMC s'effectue en quatre grandes étapes comme suit (Sami Ben Mena, BASE Vol.4, 2000) (Figure 29):

- Définir les actions,
- Définir les critères,
- Réaliser un tableau des performances,
- Et agréger les performances.

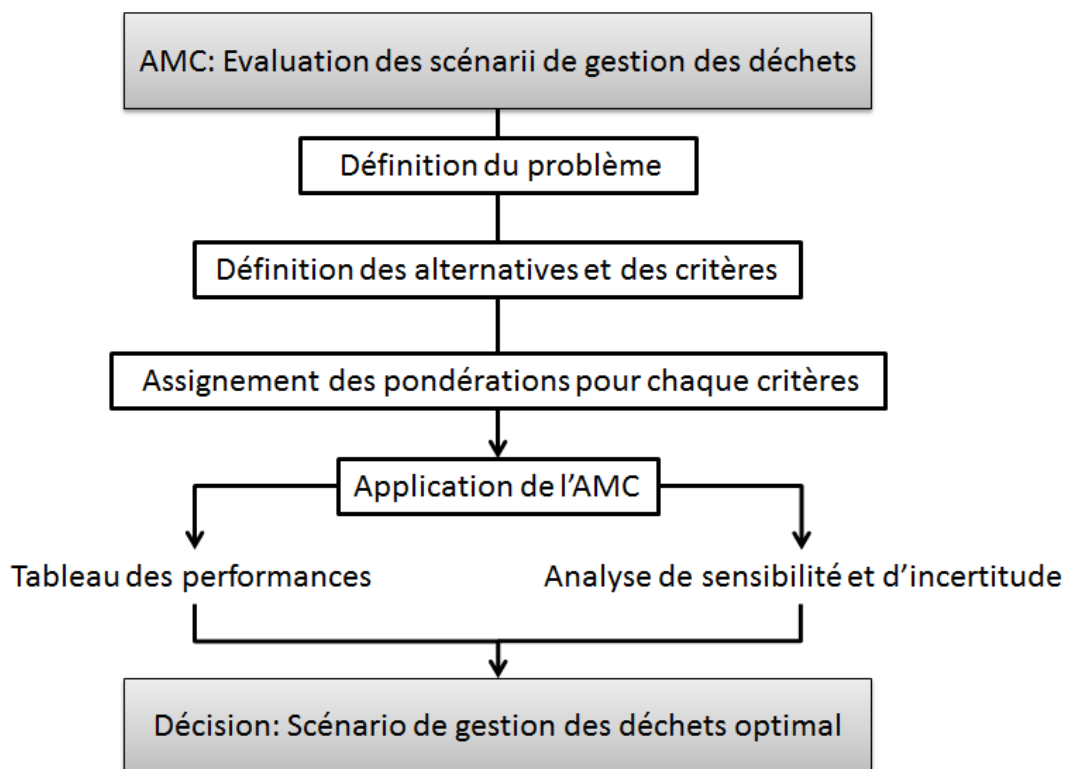


Figure 29 : Les étapes de réalisation d'une analyse multicritères

Il existe de nombreuses méthodes d'AMC mais leurs différences s'appliquent essentiellement dans leurs techniques d'agrégation. Mais avant de présenter ce classement, il semble important dans un premier de temps de définir chacune des étapes précédentes.

III.1.1 **La notion d'action**

L'action peut se définir comme étant les différentes alternatives ou propositions possibles pour une solution donnée. Lorsqu'il s'agit d'une action spatiale définit par sa position géographique, deux vues sont alors considérées : la vue discrète et la vue continue. La vue discrète s'opère quand le nombre d'actions est connu et limité. Par exemple, lorsqu'il y a dix tracés différents pour une route (Balzarini et al.). La vue continue s'exprime lorsqu'on est face à un nombre infini d'actions et non définies. Elles sont souvent formulées à partir de contraintes comme la superficie d'un terrain.

Tableau 16 : Présentation des méthodes d'agrégation et des logiciels utilisés (source : Chakhar, 2006)

	Méthode d'agrégation	Techniques et logiciels
Méthode discrète	<u>Agrégation complète</u> <i>(top-down approach)</i> On cherche à agréger les n critères afin de les réduire en un critère unique.	Weight Sum (WLC) Weight Product Method (WPM) ou Multiplication de ratios Analytic Hierarchy Process AHP Ordered Weighted Average OWA Multi Attribute Utility Theory MAUT
	<u>Agrégation partielle</u> <i>(bottom-up approach)</i> On cherche à comparer des actions potentielles ou des classements les uns aux autres et à établir entre ces éléments des relations de surclassement. On doit alors respecter l'incomparabilité. (Lehoux, Vallée, 2004)	Electre I, II, III, IV (Roy, 1968 et plus) Prométhée I et II (Brans, 1980) Melchior (Leclerc, 1984) Qualifex (Paelinck, 1976) Oreste (Reubens, 1979) Regim (Nijkamp et P. Rietveld, 1983) Naiade (Munda, 1995)
Méthode continue	<u>Agrégation locale</u> Contrairement aux méthodes discrètes, les algorithmes de résolution dans le cas des méthodes continues exigent que les préférences du décideur soient exprimées <i>progressivement</i> durant le processus de résolution. L'algorithme de résolution s'arrête lorsque le décideur accepte la solution proposée par la procédure/l'ordinateur. (Lehoux, Vallée, 2004)	Interactive Goal Programming (Dyer, 1972) STEM (Benayoun et al. 1971) PRIAM (Lévine et Pomerol, 1986)

III.1.2 **La notion de critère**

Un critère est un facteur de jugement sur la base duquel on mesure et on évalue une action ; il diffère de la notion de variable dans la mesure où un critère est relié aux préférences du décideur alors qu'une variable ne l'est pas nécessairement (Chakhar, 2006). Vincke (1992) définit le concept de critère ainsi : *Un **critère** est une fonction g , définie sur A , qui prend ses valeurs dans un ensemble totalement ordonné, et qui représente les préférences du décideur selon un point de vue.*

III.1.3 **La notion de tableau des performances**

Le tableau de performances est également appelé [...*matrice d'évaluation* ou *matrice de jugements* ou encore *matrice de décision*. Le tableau de performance est une matrice [$g_j(a_i)$] de dimension $n \times m$ où n est le nombre des actions et m le nombre de critères. Chaque ligne i exprime les performances de l'action a_i relativement aux n critères considérés. Chaque colonne j exprime les évaluations de toutes les actions relatives au critère g_j .] (Chakhar, 2006, Balzarini,).

III.1.4 **La notion d'agrégation**

Les méthodes d'agrégation peuvent être classées en trois catégories (Ben Mena, 2000):

- L'agrégation complète,
- L'agrégation partielle,
- Et l'agrégation locale.

L'agrégation complète vise à rassembler sous un même et unique critère l'ensemble des critères définis et pondérés.

L'agrégation partielle ou encore méthode de surclassement (Vincke, 1989) vise à comparer deux à deux les actions est d'observer un éventuel effet de dominance ou non voir d'égalité entre elles et ainsi faire une synthèse des informations obtenues.

L'agrégation locale consiste à sélectionner une variante et d'élaborer une proposition avec quelques alternatives puis de reprendre l'analyse en boucle. Cette approche met en jeu peu d'action et nécessite une grande implication des décideurs (Baillif, 2013). (Tableau 16)

Parmi toutes ces méthodes celle la plus utilisée est l'agrégation partielle par surclassement (Morrissey, 2004). Il s'avère de plus que pour les analyses environnementales cette méthode est la plus robuste et conseillée (Salminen et al, 1998). Plusieurs articles réfèrent les différentes approches et techniques utilisées en AMC à savoir Keeny et Raiffa, 1976 ; Roy, 1991 pour la méthode ELECTRE ; Brans et al, 1998 pour la méthode PROMOTHEE ; et Saaty, 1980 pour la méthode AHP.

Tableau 17 : Présentation des critères d'évaluation des sites d'implantation et des scénarios de gestion

Catégorie de critères	Critères à évaluer
1) Sites potentiels d'implantation	
Caractéristique du terrain	Superficie (km ²) Frontières du terrain
Occupation des sols	Occupation (présence de bâti) Plan d'occupation des sols (POS) Etat foncier (privé ou public)
Accessibilité du terrain	Altitude (m) Distance de la route (m)
Environnement : Protection contre la pollution des eaux	Proximité cours d'eau (zone tampon supérieure à 35m)
Economie : viabilité d'une éventuelle implantation	Production de déchets dans la zone (périmètre de 10km) Distance des unités de traitement existantes
Social : Nombre de personnes vivant dans la zone	Densité de population dans l'IRIS (hab/km ²)
2) Scénarios de gestion des déchets	
Caractéristique de l'infrastructure	Quantité de déchets à gérer Quantité de rejets à enfouir Taux de diversion Production d'énergie (GWh) Emprise au sol Technologies utilisées
Environnement	Emissions GES Nuisances sonores
Economie : viabilité, rentabilité et productivité de l'installation	Coûts (collecte, traitement et construction) Bénéfices des ventes
Social	Population au chômage Nombre d'habitants

Nous avons donc choisi au sein d'un panel de méthode celle de l'AMC. Maintenant que nous avons présenté cette approche d'aide à la décision, nous pouvons détailler la démarche que nous suivrons pour mener à bien notre étude dans le choix d'un scénario de gestion des déchets. Pour cela, nous présenterons pour chaque facteur (social, environnemental et économique), les critères et pondérations retenues.

III.2 Projection autour de l'évaluation des gisements de déchets et des scénarios de gestion de déchets

L'AMC est un outil d'aide à la décision basée sur des critères d'évaluation et de pondération. Il s'agit d'un outil complet permettant un support pour répondre à un problème du quotidien comme à un problème plus spécifique. Dans notre cas, l'AMC est un support au classement et donc à la priorisation à la fois de sites potentiels d'implantation d'unité de traitement que de scénarios de gestion des déchets. C'est donc dans le cadre de ces deux approches que nous avons choisi cet outil.

Le détail de ces applications toujours lié au contexte réunionnais est développé au chapitre 5. Ceci dit une AMC doit présenter plusieurs étapes et développer un certain nombre de paramètres. Ces étapes sont au nombre de trois : détermination des critères, pondération et agrégation. Par conséquent, il est fondamental d'identifier et d'évaluer les critères qui influent sur le classement i) des sites d'implantation et ii) des scénarios de gestion. Ces critères font l'objet d'une réflexion afin de déterminer leur potentiel de représentativité et d'évaluation du problème posé. Les principaux problèmes formulés dans les deux cas d'études sont respectivement la localisation des sites face aux contraintes techniques et juridiques et l'aménagement de l'unité de traitement face aux contraintes de productivité et de rentabilité.

Suite à la formulation de ces problématiques, il est envisagé de déterminer un certain nombre de critères afin d'obtenir une priorisation des solutions possibles de la meilleure à la moins favorables. Afin de présenter au mieux ces deux approches, les critères retenus pour les études sont ordonnées dans le Tableau 17. Pour le choix de ces critères, nous nous sommes appuyés sur plusieurs études ciblant les paramètres les plus pertinents dans le choix de site à aménager et dans l'élaboration de scénarios. Chabaane et al ; 2002, Dosal et al ; 2002 et Achillas ; 2010, Mareschal, 2009). En effet, comme notre étude ne porte pas sur l'aménagement d'un site en particulier ou ne traite pas d'un projet d'aménagement défini, il nous est difficile de faire appel à un panel d'acteurs. Nous avons toutefois souhaité établir nos critères sur trois piliers fondamentaux à savoir économique, social et environnemental.

L'étape de pondération des critères est une étape importante dans la prise de décision. C'est celle qui va influencer sur la prédominance d'un critère par rapport à l'autre. En général, cette pondération s'effectue lors d'une concertation entre les différents acteurs du projet étudié. Chaque groupe d'acteurs donne leurs opinions pour chacun des critères. Les résultats obtenus sont ensuite agréés selon différentes méthodes citées plus haut.

Mais dans notre cas, il ne s'agit pas de choisir un scénario de gestion pour un site particulier mais de prioriser des sites dans une zone d'étude. Dans ces conditions, les opinions des acteurs pourraient être moins utiles et biaiser les résultats. En effet, les acteurs d'une zone pourraient donner plus d'importance à un critère dans leur zone d'origine mais qui ne seraient pas représentatif d'une autre zone moins familière à leurs yeux. Par ailleurs, l'utilisation d'un jeu de pondération issue des opinions des experts pourrait accentuer ce biais et devra être traduit par une mesure du « degrés de subjectivité » dans l'analyse.

Afin de pallier à ces phénomènes de « subjectivité » et de rendre l'étude la plus impartiale possible, nous avons recherché d'autres modes de pondération dans la littérature. C'est alors que la méthodologie de pondération proposée par Alvarez, nous est apparue comme la plus pertinente (Alvarez et al, 2009). Cette méthode consiste à élaborer plusieurs scénarios de pondération. Pour chaque scénario, une distribution différente des pourcentages (de 0 à 100%) est attribuée aux critères. Deux types de critères sont alors identifiés, le critère limitant et les autres. Le critère limitant correspond au paramètre le plus important et par conséquent celui qui peut influencer les résultats de l'analyse. Cette comparaison par facteur limitant (contrairement aux autres facteurs) permet d'identifier la sensibilité de l'alternative sélectionnée (classement) à ces variations de poids.

Pour l'étape d'agrégation, plusieurs méthodes sont possibles. Ces approches différentes sont l'objet de divers logiciels d'application permettant un résultat instantané après configuration des données. Ici, nous nous sommes intéressés au logiciel visual PROMOTHEE. Au vu de la littérature, cette méthode française de surclassement est très développée et réputée dans l'analyse de scénarios environnementaux (Behzadian, 2010 ; Brans, 1994 ; Briggs, 1990 ; D'Avignon, 1989 ; Huguenin, 2015 ; Hung, 2007 ; Le Têno, 1998 ; Mareschal, 1998 ; Stewart, 1992 ; Van Huylenbroeck, 1995). Cette méthode et le choix y étant associé est plus longuement détaillé dans le chapitre 5.

Pour classer de manière pertinente des scénarios de gestion des déchets à la Réunion, l'AMC constitue donc un outil fondamental. Cet outil intervient à partir de la deuxième étape applicative c'est-à-dire l'étude des sites potentiels. Les sites potentiels d'implantation sont issus d'un long processus de cartographie à l'aide de logiciel SIG. Le but final est d'obtenir une cartographie des sites potentiels sur le territoire réunionnais répondant aux contraintes techniques et juridiques. Pour ce faire, une méthodologie dite d'élimination a été élaborée. Elle consiste dans un premier temps à identifier et à éliminer toutes les surfaces et zones non exploitables pour l'étude dites « zones d'exclusion ». Et dans un deuxième temps, à croiser les zones d'exclusion sélectionnées aux zones les plus productrices en déchets déterminées au cours de l'étape 1 (l'étude du gisement de biodéchets). L'AMC permet par conséquent d'établir un classement des sites potentiels au regard de la législation et des zones productrices en déchets et donc nécessiteuses d'unité de traitement. Dans le cas 2, l'AMC est considérée pour le classement de scénarios de gestion des déchets basée sur des typologies de besoins (énergétiques, en amendements ou autres) et sur les caractéristiques à la fois du gisement de la zone d'implantation et de l'unité de traitement.

Pour caractériser les critères retenus et ainsi pouvoir mettre en application l'AMC une importante quantité d'informations ont dû être collectées. Ces données sont notamment issues de diverses sources cartographiques (DEAL, DRAAF, Région...) dans le cas 1 (sites d'implantation) et de fabricants internationaux d'unités de traitement pour le cas 2 (scénarios de gestion). Ces données comme présentées dans le Tableau 17 s'articulent symboliquement autour des notions ou des paliers du développement durable, à savoir l'aspect économique, l'aspect environnemental (pollution et intégration à l'environnement) et l'aspect purement technique lié aux caractéristiques du terrain et de l'infrastructure.

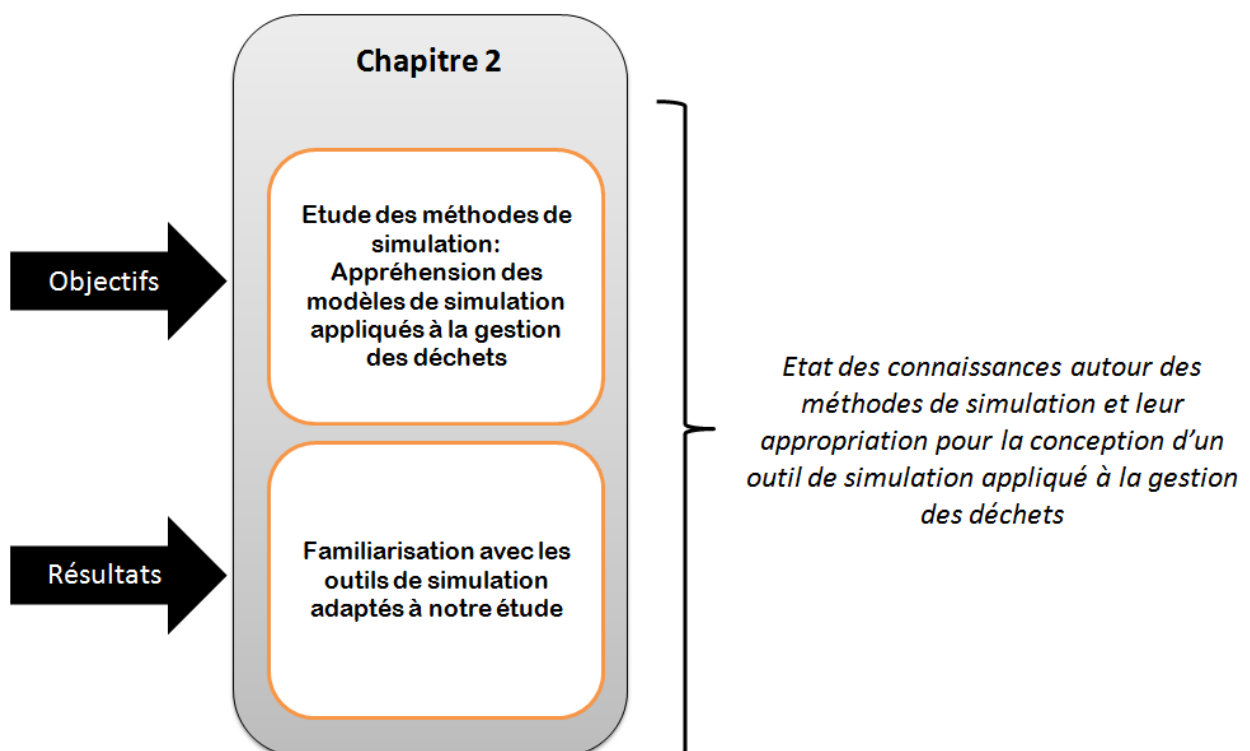
IV. Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons pu identifier un certain nombre d'outils d'analyse. Deux ont retenu notre attention car permettant de répondre aux problématiques posées. Nous rappelons que la problématique est la suivante : Quelle gestion des déchets (biodéchets) pour demain au regard de la saturation des ISDND dans un objectif de valorisation énergétique des gisements existants. Ces deux outils sont l'ACP et l'AMC. La première plutôt statistique et la deuxième d'aide à la décision. Ces méthodes, bien que différentes, présentes dans notre étude des objectifs complémentaires car l'action d'une fortifie et justifie l'autre. En effet, l'ACP permet de lire au travers de la base de données du gisement des biodéchets qui constitue la première étape de notre analyse par la mise en exergue de typologies de communes. Par ailleurs, l'AMC s'en trouve fortifiée du fait que l'élaboration des scénarios sera simplifiée par l'utilisation des typologies proposées par l'ACP et par conséquent réduite à 5 typologies contre 24 initialement prévues (communes). Ces observations autour des outils d'analyses, nous ont permis d'interpréter et de mettre en lumière un certain nombre d'interrogations mais également de répondre à la nécessité d'adapter les scénarios au territoire d'étude.

Maintenant que la question de l'analyse des données est solutionnée, il nous est possible de mettre en place une méthode de simulation afin de définir la démarche scientifique dans laquelle s'intègre ces outils d'analyses. Le chapitre 2 s'attache donc à présenter le cadre et l'approche méthodologique de simulation sur lesquels reposent nos observations et nos hypothèses de recherche. Nous pouvons visualiser les outils d'analyses comme des moyens d'atteindre la cible. La réponse aux objectifs visés et la simulation sont alors le chemin à parcourir pour y arriver. Autrement dit le trajet parcouru par la flèche pour atteindre la cible. C'est au travers de cadres bien spécifiés que nous nous engageons, à savoir l'analyse systémique et le cadre normatif de l'analyse de cycle de vie.

Chapitre 2

Bases méthodologiques des outils de modélisation et de simulations



Sommaire

I. Introduction à la simulation	134
II. L'approche systémique.....	136
II.1 Introduction à la systémique	136
II.2 Les préceptes et les concepts de l'approche systémique	138
II.2.1 Les préceptes de l'analyse systémique	138
II.2.1.1 Le précepte de téléologie	138
II.2.1.2 Le précepte de pertinence	138
II.2.1.3 Le précepte de globalité.....	138
II.2.1.4 Le précepte de d'agrégation.....	139
II.2.2 Les concepts de l'analyse systémique	139
II.2.2.1 Le concept de complexité	139
II.2.2.2 Le concept d'interaction	139
II.2.2.3 Le concept d'organisation.....	140
II.2.2.4 Le concept de totalité	142
II.3 Qu'est-ce qu'un système complexe ?.....	143
II.3.1 Les aspects structurels	143
II.3.2 Les aspects fonctionnels.....	144
II.4 La démarche méthodologique de l'approche systémique	145
II.5 Projection : Appropriation et description générale de l'approche systémique développée	148
II.6 Définition des termes utilisés pour la démarche méthodologique.....	148
III. Référence au cadre normatif	149
III.1 Introduction	149
III.1.1 Etape de conception et de réalisation d'un outil de modélisation.....	150
III.1.2 Détermination des indicateurs d'impact environnementaux	150
III.1.3 Explicitation des facteurs d'émission pour le bilan carbone.....	150
III.2 Le contexte normatif.....	152
III.3 Cadre normatif développée autour de l'ACV	154
III.3.1 Introduction à l'ACV.....	154
III.3.2 Focus sur les paramètres environnementaux à considérer dans une ACV ?	158
III.3.3 Les outils d'application de la démarche ACV	158
III.4 Cas particulier : Présentation du cadre normatif appliqué à la gestion des déchets	160

III.4.1	Les particularités de la méthodologie	160
III.4.2	Caractéristique des outils existants pour l'ACV des déchets	162
III.4.3	Les limites de l'ACV déchets	162
III.5	Projection développée autour de l'ACV appliquée à la gestion des déchets	163
IV.	L'approche typologique	164
IV.1	Introduction à l'approche typologique	164
IV.2	Présentation des typologies	165
IV.2.1	Typologie spatiale	165
IV.2.2	Typologie des flux matières	165
IV.2.3	Typologie des flux énergie	165
IV.2.4	Typologie structurelle	165
IV.2.5	Typologie fonctionnelle	166
IV.2.6	Typologie des procédés	166
V.	Conclusion	166

I. Introduction à la simulation

La description d'un système de gestion des déchets fait intervenir un grand nombre de phénomènes et donc de paramètres de fonctionnement en relation avec des actions thermiques, mécaniques, électriques, chimiques et radiatives (Gatina, 2004). A ces paramètres technologiques s'ajoutent des paramètres économiques, sociaux, environnementaux, voir même juridiques et politiques. De ce fait, la description du système par des démarches classiques de modélisation est rendue difficile. La description d'un système complexe fait intervenir beaucoup de notion autour de ses caractéristiques structurales, de ses degrés de liberté ou paramètres de fonctionnement, autour de son degré de complexité, autour de ses flux entrants et sortants. La complexité du système observé conduit à une approche descriptive spécifique et adaptée. Il nous sera donc nécessaire de développer une démarche scientifique particulière pour avancer dans nos objectifs de recherche. Pour cela, la référence à divers concepts et méthodes d'analyses est alors considérée. Les références auxquelles, nous avons choisis de faire appel dans notre démarche scientifique sont l'approche systémique dans un premier point, la notion de cadre normatif appliqué à l'analyse de cycle de vie dans un deuxième point et l'approche typologique dans un troisième et dernier point.

Mais avant de présenter ces démarches, il semble essentiel de poser le cadre autour du vocable « simulation ». La simulation peut être définie de différentes manières, nous avons donc extrait et synthétisé les notions qui à notre sens nous paraissent les plus explicites dans notre cas. La simulation constitue une reproduction virtuelle du fonctionnement d'un système (CNRTL, 2012). La simulation est par conséquent une démarche permettant d'étudier les « résultats » d'une action (thermique, mécanique, chimique, biologique ou autres) sur un élément ou un ensemble d'éléments sans avoir à réaliser l'expérience sur l'élément réel. Pour ce faire, la simulation peut être mise en œuvre par une modélisation dite **numérique** ou **analogique**. La simulation a donc comme moteur la modélisation. Ici, nous définissons la modélisation comme une opération par laquelle on établit le modèle d'un système complexe afin d'en étudier plus commodément et de mesurer les effets sur ce système des variations de ses éléments composants (Giraud-Pamart, 1974). Autrement dit, décrire et prévoir l'état du système si on lui applique une sollicitation quelconque (Bouyssou, 2003).

Comme précisé, il existe deux types de modélisations : la modélisation numérique et la modélisation analogique. La modélisation numérique fait appel à des représentations théoriques reposant, soit sur des lois universelles de la physique, soit sur des modèles mathématiques à divers degrés d'empirisme. Ces lois ou modèles repose sur ensemble de fonctions, d'équations ou de formulation numériques décrivant à la base les phénomènes en jeu dans le système.

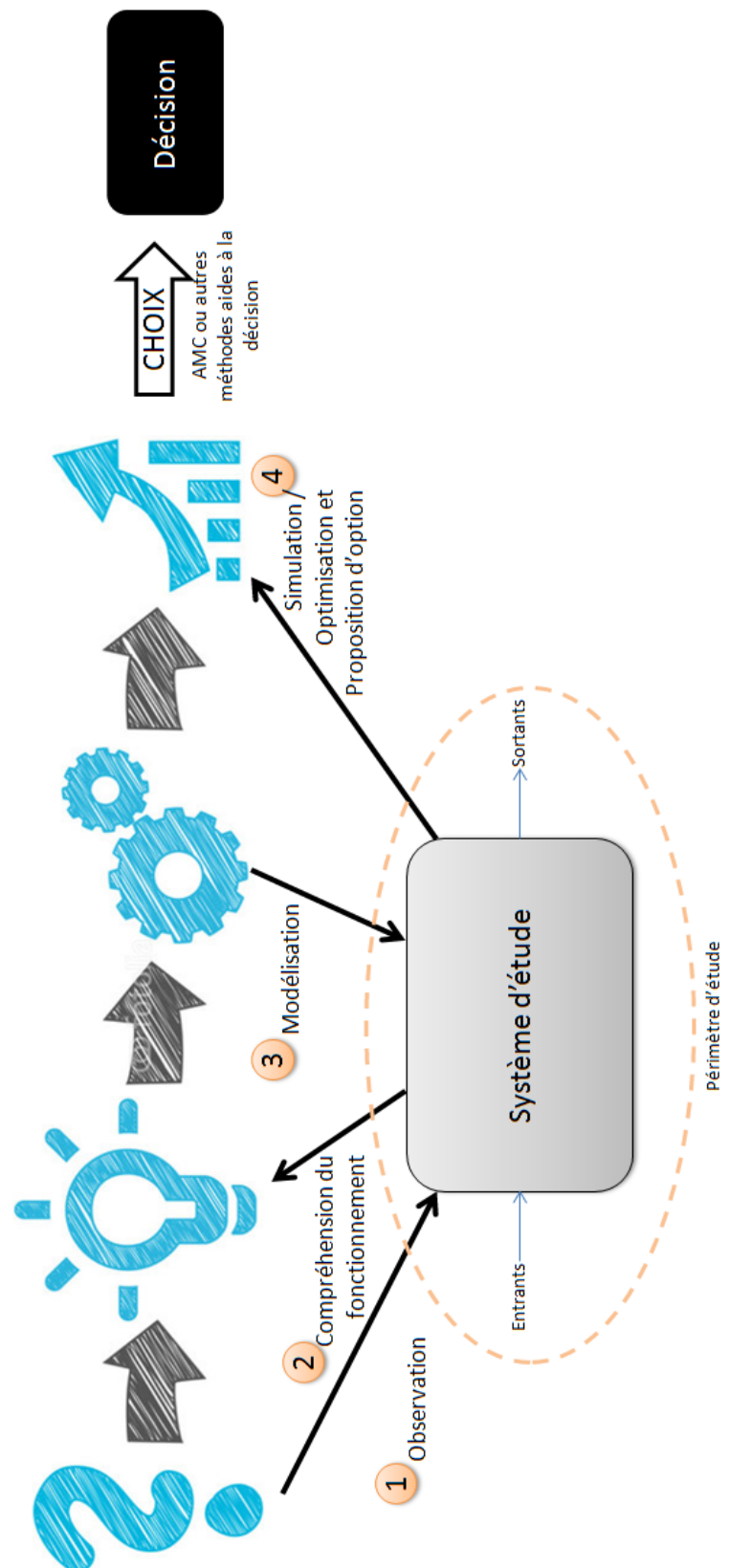


Figure 30 : Synthèse de la démarche scientifique (source : HATIK, 2015)

La modélisation analogique fait appel à des modèles physiques ou mathématique dans des champs d'observation équivalente qui reproduisent plus ou moins bien le phénomène à étudier, mais plus commode d'accès tant au niveau de leur représentation théorique qu'expérimentale. La représentation des résultats se fait alors le plus souvent sous formes graphiques et visuelles.

Dans tous les cas, la modélisation a pour objectif de prédire les modifications du système par variations des paramètres structurels ou fonctionnels le constituant. Il est important de cerner le niveau de simplification du modèle selon le degré de complexité du système lors de l'étape de modélisation. Le modèle conçu doit être simplifié par rapport un modèle réel de manière à faciliter son appréhension et sa compréhension.

Un modèle est en résumé un système physique ou mathématique **représentant les structures essentielles** d'une réalité et capable à son niveau d'en expliquer ou d'en reproduire dynamiquement le **fonctionnement**. (Birou, 1966). La description s'effectue à différents niveaux de manière qualitative par identification des paramètres des entrées et des sorties ; et de manière quantitative afin de les caractériser par des grandeurs.

Ces deux derniers paragraphes sur la simulation ont pour but de préciser de manière générale l'environnement de la simulation. A savoir, que la simulation s'intègre normalement dans un processus de décision. En effet, lorsqu'un problème ou une interrogation se présente, il est primordial de se décider sur le résultat escompté avec comme cœur d'action la modélisation. C'est en cela que se fonde une démarche scientifique. Ici, c'est en animant l'observation d'un objet théorique par la modélisation et ses mouvements par la simulation et pouvant être validé par vérification expérimentale de chaque élément de la structure du modèle (Figure 30).

Dans ce chapitre, nous exposons donc les bases de notre approche méthodologique de description, en s'appuyant sur des cadres référentiels tels que l'approche systémique, l'approche normative notamment accès sur l'analyse de cycle de vie et sur l'approche typologique. L'ensemble de ces observations et de ces analyses ont pour objectifs la réalisation d'un outil de simulation permettant la construction de scenarii de gestion des déchets via une approche systémique « normée » et la conception d'un outil global d'évaluation de ces scénarios. Les différentes parties de ce chapitre s'attachent donc à présenter très clairement la démarche scientifique adoptée.

II. L'approche systémique

II.1 Introduction à la systémique

Nous avons pu constater au cours des chapitres précédant que la « gestion des déchets » est en fait une terminologie englobant un certain nombre d'étapes, de paramètres, de transformations et de transferts entre différents lieux et acteurs. Partant de cette constatation, il est intéressant de considérer la gestion des déchets comme un système complexe, composé de plusieurs éléments en interactions les uns avec les autres selon des actions, des modalités ou encore des processus de

fonctionnements différents. L'approche ou l'analyse systémique est la science, la méthode ou même l'état d'esprit qui permet de décrire ces systèmes complexes. Il en découle une démarche particulière dont les préceptes sont complémentaires à ceux de l'approche cartésienne qui s'applique à des objets d'étude où interviennent un nombre limité de phénomènes.

L'approche cartésienne vise à identifier l'origine du phénomène pour aboutir au « pourquoi de la cause ». Elle aboutit à l'explicitation de lois universelles incontournables dans le champ d'étude défini. Le système ou objet d'étude est alors disséqué en éléments fictifs simples identifiés comme des entités mathématiques (éléments de volume, de surface ou de longueur, point), sur lesquelles on appliquera des lois d'équilibre ou de conservation élémentaire autour des sollicitations en jeu. Les premières équations de description qui en découlent feront l'objet de raisonnements mathématiques autour par exemple d'outils algébriques ou analytiques adéquat permettant de mettre en évidence les lois expliquant les observations étudiées. En procédant ainsi nous pouvons révéler à nos yeux ce qui leur été jusque-là invisible. L'approche cartésienne invite donc le scientifique à dissocier ou discrétiser la représentation physique du système en entités mathématiques fictives et à considérer un à un les phénomènes en jeu sans se préoccuper véritablement de la réalité de leur assemblage ou agencement. Elle l'invite donc à s'affranchir du réel pour mettre en évidence dans un espace fictif, les explications recherchées. Ces explications sont cernées à partir d'expressions mathématiques qui véhiculent des lois universelles sous le sceau de l'évidence. Elles s'imposent donc à tout observateur.

La récente prise de conscience (fin du 20^{ème} siècle) de la complexité environnante de notre monde a encouragé l'émergence d'une nouvelle pensée, d'une nouvelle approche : la systémique. En effet, l'approche cartésienne ne convenait pas dès lors que l'on considère la complexité organisée des écosystèmes, de l'économie voir même de la sociologie. La systémique se trouve donc fondée sur de nouveaux préceptes à dimensions « non scientifiques » prenant notamment en compte les aspects d'instabilité, d'ouverture, de fluctuation, de chaos, de désordre, de flou, de créativité... Des préceptes quelques peu différents de l'approche cartésienne bien que complémentaires se positionnent sur la « compréhension du comment ? » Quelles sont les conséquences des phénomènes observés dans le but de décrire le fonctionnement du système étudié dans son ensemble. Ici, il nous appartient de définir nos paramètres de réflexion et d'analyse : qu'est-ce-que nous souhaitons démontrer ? De ce constat, l'analyse réalisée est fortement liée à notre subjectivité et à notre vision. Il devient alors primordial de donner un sens à nos recherches et résultats par une méthode de validation des plus rigoureuses à l'aide d'outils calibrés, performants et de références comme par exemple l'analyse de cycle de vie (ACV).

II.2 Les préceptes et les concepts de l'approche systémique

II.2.1 Les préceptes de l'analyse systémique

Les préceptes de l'approche systémique sont au nombre de quatre et sont organisés comme suit : le précepte de téléologie, le précepte de pertinence, le précepte de globalité et le précepte d'agrégation.

II.2.1.1 Le précepte de téléologie

Au travers de la simulation et donc de la modélisation, l'objectif maître est de décrire le fonctionnement ou le comportement des dispositifs étudiés dans leur ensemble. Il s'agit donc de comprendre avant tout un fonctionnement à priori global du système (Gatina, 2004). Ici, il est important de se placer dans une logique de compréhension du système en s'interrogeant sur le **comment du fonctionnement** qui se traduit par la compréhension autour de l'identification et de l'agencement des phénomènes et de leurs conséquences sur l'état du système. Les analyses conduites portent donc sur les variations et modifications opérées sur le système d'étude ainsi que son évolution.

Ce précepte est complémentaire au précepte de causalité de l'approche cartésienne. Pour expliquer, on regarde en arrière en remontant à la cause voire la cause la plus originelle qui soit. Pour comprendre, on regarde en avant en observant les conséquences des phénomènes voire à leur aboutissement la plus ultime.

II.2.1.2 Le précepte de pertinence

Dans un tel contexte de modélisation, l'observateur est maître dans la conception du modèle. C'est à travers son regard et son interprétation qu'il façonne le système considéré. Comme développé en introduction de ce chapitre, une démarche scientifique suite à un questionnement doit faire appel à des références qui nous appartient de choisir. Les analyses menées sont donc inéluctablement arbitraire et soumis par conséquence à une logique de pertinence. La modélisation d'un système complexe exige donc une étape de validation pour s'assurer de la pertinence des multiples choix que nous sommes amenés à faire. Cette étape, d'une nécessité absolue dans la conduite de notre étude d'un système complexe se fera de manière rigoureuse et selon une démarche le plus souvent **codifié**, faisant appel à des bases de connaissance et des outils les plus élaborés (Gatina, 2004).

Ce précepte est à mettre en exergue par rapport au précepte d'évidence de l'approche cartésienne. Dans cette dernière les explications autour des phénomènes observés s'imposent à l'observateur et constitue des vérités considérées comme absolues. Dans l'approche systémique la compréhension du fonctionnement du système repose sur la pertinence des descriptions qui seront retenues par l'observateur, qui construira donc des représentations relatives de la réalité.

II.2.1.3 Le précepte de globalité

Ce précepte expose le fait qu'il est recommandé d'observer, de comprendre et d'expliquer le système toujours dans son ensemble. Pour ce faire, il est préférable de décomposer le système en **entités physiques** fonctionnelles interconnectées. Ces entités à un niveau ultime correspondent à des composants ou éléments du

système caractérisés par une structure et un fonctionnement clairement explicité (Gatina, 2004). Autrement dit, afin d'appréhender au mieux la description d'un système dans sa globalité, il est préférable d'en connaître les recoins en le décortiquant, le coupant en sous-systèmes, en éléments, en entités physiques ancrées dans le réel au cœur du système. C'est en considérant ces entités internes au système que la compréhension et l'explicitation du système s'effectue globalement.

II.2.1.4 Le précepte de d'agrégation

A l'image du précepte de globalité qui vise à ne dissocier aucunes parties du système. Le précepte d'agrégation vise au niveau des systèmes et des sous-systèmes à relier l'ensemble des phénomènes entre eux. Les termes explicitant les phénomènes doivent être à cette échelle très clairement définis généralement par des équations de conservation ou toutes autres équations mathématiques.

II.2.2 Les concepts de l'analyse systémique

Les concepts de l'analyse systémique sont également au nombre de quatre et découlent des préceptes exposés ci-dessus. Ces concepts permettent l'élaboration d'un cadre d'analyse pour la mise en place d'**outils** permettant la description rigoureuse d'un système complexe. Ces concepts sont les suivants : le concept de complexité, le concept de d'interaction, le concept d'organisation et le concept de totalité.

II.2.2.1 Le concept de complexité

Un système complexe, comme nous avons pu le constater jusqu'ici, est composé de nombreux sous-systèmes, d'**éléments** ou composants, chacun concerné par divers phénomènes liés à diverses actions, le tout relié dans un réseau complexe d'**interactions**. Le degré de complexité d'un tel système dépendra donc avant tout, du nombre de phénomènes qui lui est associé et donc du nombre d'**état** qu'il peut prendre en relation avec ses degrés de liberté (Gatina, 2004). Il faut souligner que le degré de complexité influe sur la démarche de modélisation. Plus un système est complexe, plus il doit être décrit à partir de **modèles ou lois physiques simplifiés**. La description sera ainsi pertinente, même si le système d'équations qui le représentera sera moins bien conditionné. Il sera en revanche plus stable car moins sensible aux perturbations des variables. Cette « propriété » repose sur une constatation de bon sens, un système disposant d'un très grand nombre de degrés de liberté dispose en général de plus de potentialité pour répondre à des perturbations et tendre vers son point d'équilibre. Les paramètres associés à la description sont moins sensibles dans leur ensemble, ce qui permet une résolution aisée des **équations de description** (Gatina, 2004).

II.2.2.2 Le concept d'interaction

Ce concept directement lié au précepte d'agrégation vise à identifier les actions communes présentent à chaque niveau d'observation du système mais également leur effet sur l'état du système et par conséquent sur ses **éléments** et sur ses **matières convectées** en son sein. C'est au travers notamment de l'analyse des flux

et dans un concept de globalité que l'identification des actions est rendue possible. Ces flux peuvent être de différents types, à savoir les flux matières, les flux d'énergie ou encore des flux d'informations. La connaissance des interactions passe donc par l'explicitation de ces flux.

Ces flux ont un ordre de variation important, ils arborent des caractéristiques différentes selon le système et les actions s'y trouvant. Ils évoluent et se transforment en fonction de leur cheminement au sein des sous-systèmes et des éléments les composants. Le flux matière est souvent associé un débit massique ou volumique mais il peut être représenté par d'autres variables dans le cas de mélange au sein des matières convectées et du système étudié. Le flux énergie peut prendre évidemment plusieurs formes selon les actions et les transformations en jeu. Les variables associées au flux d'information sont diverses (entropie, contenus des chromosomes, consigne des commandes, ...) (Gatina, 2004).

Les interactions s'opèrent selon plusieurs modes. Elles peuvent être à sens unique, à double sens et simultanées entre systèmes, à double sens mais en déphasage dans le temps ou encore de type s'appuyant sur une boucle de rétroaction (feed back). Dans ce dernier, un dispositif de contrôle permet d'ajuster l'effet de l'action au but à atteindre. La boucle de rétroaction est dite positive, si elle ne peut contrôler l'action entraînant ainsi la destruction ou la disparition du système. Dans le cas contraire où elle permet le maintien à l'équilibre du système autour d'un point de fonctionnement, la boucle de rétroaction est dite négative. L'état d'équilibre se traduit donc par un bon ajustement entre la rétroaction positive et négative, faisant appel à des lois de régulation basées principalement sur des phénomènes (mécaniques, électriques, thermodynamiques...). C'est l'état global du système en relation avec l'état de chaque sous système qui commandera les caractéristiques des interactions (Gatina, 2004).

II.2.2.3 Le concept d'organisation

Le concept d'organisation est le cœur de l'approche systémique. En effet c'est l'observation de cette organisation qui va déterminer l'agencement des éléments et par conséquent la description du système constituant le cœur même de la démarche de modélisation. La modélisation du système se fait donc par la description et la mise en évidence de tous les aspects des éléments du système. Ces aspects s'appuient sur l'identification de deux types de grandeur: structurels et fonctionnels. Les aspects structurels s'attachent à la description des configurations **géométriques et des** caractéristiques **physiques** autour du système et des flux dont celui-ci est le siège. Les paramètres ou caractéristiques physiques décrivent les plus souvent les propriétés du système et des matières convectées. Ils décrivent donc précisément les phénomènes en jeu dans le système.

Ce sont des variables internes aux systèmes. Les paramètres fonctionnels décrivent l'état du système, plus précisément, les sollicitations et les réponses en jeu dans le système. Ils sont le plus souvent associés aux matières convectées. Ils constituent ce que l'on appelle couramment les degrés de liberté du système. Beaucoup de ces variables s'observent à la frontière des systèmes. A ce stade de la description des systèmes nous chercherons à établir des relations entre les variables structurelles

et les variables fonctionnelles. La mise en œuvre de ces relations constitue véritablement l'étape de modélisation. Le nombre d'équations à établir correspond exactement au nombre de paramètres de fonctionnement inconnus. Leur identification dépend du problème posé. Cependant, dans une démarche de modélisation, il est courant de considérer que les paramètres de sollicitation sont connus et les paramètres de réponse inconnus. On se positionne alors dans le cadre d'un problème direct. Dans le cas contraire on a affaire à un problème inverse. Dans le cas où les inconnus sont partiellement des paramètres de sollicitation et de réponse, on est alors dans le cadre d'un problème mixte. Notons que des caractéristiques physiques peuvent déjà faire intervenir des paramètres de fonctionnement dans sa définition (une masse volumique, par exemple, peut être intrinsèquement en relation avec une température). Ces relations intermédiaires ne sont pas au cœur de la modélisation. Pour avancer dans cet objectif, plusieurs démarches sont possibles, en relation avec des lois de conservation explicites ou implicites, autour des modèles physiques universelles, de lois mathématiques ou de bases de données d'observation. Nous les résumons ci-après :

- 1) Nous pouvons réaliser un bilan des flux matières, des flux d'énergie et des flux d'information. Si ces équations font intervenir uniquement des lois universelles dans leur représentation, nous nous situons dans une approche purement phénoménologique. Ces équations de bilan peuvent être explicites ou implicites, une analyse fine nous permettra de compléter ces équations à partir de relations de comportement (relations d'état de la matière, lois d'états de gaz parfait, relations de saturation autour des changements de phase, ...). Ces équations reposent sur différents niveaux de description plus ou moins détaillés selon le degré de complexité du système.
- 2) Dans le cas où nous ne disposons d'aucun modèle physique pour réaliser nos équations de bilan, ou expliciter certains termes du bilan, nous faisons appel à des relations mathématiques, s'appuyant sur des démarches expérimentales donc liés à un contexte d'observation précis. Ces représentations mathématiques reposent par exemple sur des lois de corrélation ou d'interpolation, mais aussi sur des approches neuronales ou des algorithmes génétiques. Selon les situations nous caractérisons nos démarches dans le cadre d'une modélisation « boîtes noires » ou « boîte grises »
- 3) Dans un dernier cas, nous disposons de données expérimentales ou de simulation partielle en relation avec des flux d'entrée et de sortie. Cette situation courante dans le cas où les procédés de transformation sont élémentaires ou dans le cas où nous nous situons dans une approche de gestion des flux que de procédés technologiques. Nous nous situerons plus dans le cadre d'analyse et d'interprétation de données autour des flux. L'approche systémique ne constitue plus alors un cadre de modélisation mais un cadre d'analyse élaboré des observations.

II.2.2.4 *Le concept de totalité*

Le concept de totalité est lié au précepte de globalité et d'agrégation. Ce concept précise l'importance d'assembler l'ensemble des éléments ainsi que l'ensemble de leurs aspects structurels et fonctionnels, l'ensemble des **interactions** en relations avec les phénomènes et flux associés. Certaines propriétés peuvent être présentes à des niveaux inférieurs d'organisation qui ne seront pas visibles ou représentées dans l'observation globale. C'est en considérant cette totalité à tous les niveaux d'observation que le système peut révéler toutes ces caractéristiques et renseigner de manière fiable sur la réponse d'un système complexe global. La totalité précise « qu'un système est un tout non réductible à ses parties » comme le cite Von Bertalanffy.

Ce dernier concept nous est utile pour définir une stratégie de résolution des systèmes d'équations ou d'analyse des résultats. Elle nous guide dans la manière de tout mettre en relation avec tout.

Les préceptes et les concepts de l'approche systémique constituent un cadre rigoureux et méthodique dans l'étude analytique et la modélisation d'un système. C'est en cela que nous avons choisi de s'intégrer dans une telle approche afin de bénéficier d'une expertise et d'une validation des travaux conduits. Par cette approche, nous sommes amenés à mettre en œuvre des démarches et méthodologies particulières pour conduire l'étude des systèmes complexes dans les étapes de modélisation, d'expérimentation et d'analyse des paramètres de fonctionnement (Gatina, 2004). Par ailleurs, il semble important à ce stade maintenant que les bases sont posées de définir toujours dans une optique de rigueur ce qu'est un système.

II.3 Qu'est-ce qu'un système complexe ?

Un système complexe au vu des développements précédents peut se définir, se décrire notamment par le biais des aspects structurels et fonctionnels. Quelle que soit l'échelle d'observation considérée, nous sommes amenés à l'appréhender dans le « réel » (Figure 31).

II.3.1 Les aspects structurels

Les aspects structurels d'un système s'attachent à décrire géométriquement et physiquement le système autour de quatre types composants : la frontière, les éléments, le réseau de transport et le réservoir.

La frontière correspond à la limite qui sépare le système étudié de son environnement qu'elle soit perméable ou non, rigide ou floue, arbitraire ou évidente, matérielle ou immatérielle. C'est à ce niveau que se positionnent les différents flux (matière, énergie et information) qui expliciteront les interactions en jeu.

Les éléments sont assimilés aux composants du système, ils peuvent être identifiés, classés, dénombrés ou encore quantifiés. C'est au travers des grandeurs géométriques et physiques du système que sont explicitées notamment les phénomènes et actions au cœur des éléments.

Le réseau de transport assure la circulation des flux, c'est par son biais que se matérialise les interactions dans le système. Il peut être matériel ou immatériel mais permet surtout de caractériser les grandeurs physiques et géométriques du système ainsi de la nature de matières convectées associées aux phénomènes.

Le réservoir est indispensable à un bon fonctionnement du système en palliant aux phénomènes de fluctuation. Il assure un rôle évident de régulation et de stockage au sein duquel ne s'effectuent aucunes transformations des matières convectées. Par conséquent aucun phénomène ne lui est associé et seules ses caractéristiques géométriques devront être explicitées.

La description structurelle facilite la compréhension de l'agencement des éléments entre eux en considérant notamment leur géométrie et leurs propriétés physiques liées aux phénomènes.

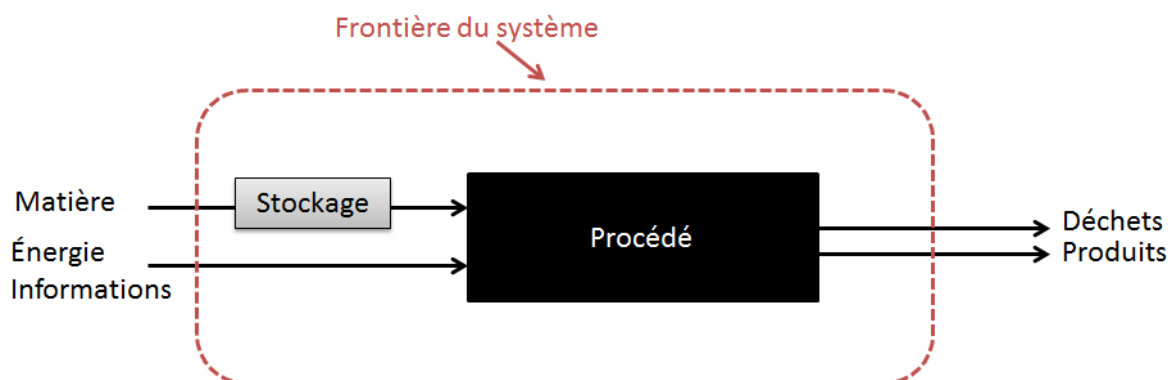


Figure 31 : Synthèse du système (Durand, 2006)

II.3.2 **Les aspects fonctionnels**

Les aspects fonctionnels d'un système s'attachent quant à eux, à décrire l'état du système en relation avec ses degrés de liberté possible. Notons que les phénomènes qui sont au cœur du fonctionnement et auxquels s'associent des actions, des flux et donc des interactions. L'étude des aspects fonctionnels constitue alors la modélisation globale du système. Comme nous avons pu le voir, la description des phénomènes et la démarche générale de modélisation repose principalement sur des lois physiques ou modèles mathématiques. On retrouvera à ce niveau tous les paramètres liés au fonctionnement du système qui peuvent être des variables internes au système ou encore des entrées et sorties mathématiques ou physiques. Les paramètres considérés sont associés aux flux et aux composants du système.

Les lois mathématiques développées s'attachent donc à décrire les processus ou les actions mis en jeu dans toutes leurs caractéristiques ainsi que les événements et phénomènes liés au fonctionnement du système dans le temps (Gatina, 2004). Pour cela, il est nécessaire de définir des lois régissant notamment les flux et les processus de transformation en action au travers de lois ou de bilans de conservation de la matière, de l'énergie et de l'information ou encore des relations d'état comme les lois de corrélations.

A ces aspects d'autres notions peuvent être introduites comme la notion de système fermé et ouvert ou encore la notion de boîte noire. L'**aspect structurel** d'un système en relation avec son environnement peut être observé selon deux points de vue dit en « système ouvert » ou en « système fermé ». Le système ouvert prendra en considération les échanges de flux (matière, énergie et informations) ayant lieu avec son environnement et au contraire un système fermé est observé comme fonctionnant en autarcie sans échange avec son environnement. Bien évidemment de telles proportions dans la nature sont rares mais il dépend du choix de l'observateur d'étudier ou non son interaction avec l'extérieur. Par ailleurs, l'**aspect fonctionnel** d'un système peut lui aussi être appréhendé selon deux points de vue dit en « boîte noire » et en « boîte blanche ». L'observateur qui évolue selon un système en boîte noire fait le choix d'ignorer le fonctionnement de ladite boîte représentant un élément du système et de ce fait ne considère que les entrées et les sorties. A l'inverse, un système observé en boîte blanche fait apparaître tous les mécanismes présents dans l'élément, rendant le fonctionnement intelligible.

En résumé, un système est complexe de par ces multiples facettes mais se doit d'être considéré dans son ensemble, de manière organisée structurellement et fonctionnellement et en connexion avec son environnement. Il se caractérise par des entrées et des sorties (matières convectées et flux), des paramètres structurels et fonctionnels et d'éléments le tout lié à des phénomènes autour d'actions mécaniques, électriques et autre et en interaction. L'approche systémique permet de visualiser les systèmes et autres objets du quotidien sous un angle global et d'observer de façon générale, totale.

Jusqu'ici, nous avons tenté de poser le cadre et les bases de l'approche systémique dans un but de modélisation. Notre prochain point s'attache donc à développer la procédure ou encore la démarche méthodologique d'une approche systémique dans un contexte de modélisation.

II.4 La démarche méthodologique de l'approche systémique

En application, l'approche systémique est une technique d'aide à la décision. Afin d'atteindre cet objectif, il est utile de présenter la démarche à suivre en synthétisant et en reprenant les termes précédents. Nous avons donc pu extraire 7 étapes :

- L'identification et la caractérisation des sous-systèmes constituant une unité fonctionnelle cohérente ;
- L'identification et la caractérisation de l'ensemble des flux interagissant entre les sous-systèmes ;

La description structurelle des différents niveaux d'observation (sous-systèmes, éléments ou composants) au travers des dimensions, des caractéristiques physiques et des matières convectées ;

- La description fonctionnelle du système par l'explicitation des paramètres de fonctionnement ou d'état du système au travers notamment d'équations de description (lois de conservation des flux) pour chaque niveau d'observation (sous-systèmes, éléments...) ;
- La mise en œuvre d'une stratégie de résolution basée pour l'essentiel sur des méthodes itératives adaptées aux caractéristiques et fonctionnement du système complexe et permettant de converger vers une solution cohérente. Nous distinguons trois niveaux dans les processus itératifs :
 - I. Itération globale au niveau de l'ensemble des sous-systèmes définis comme des entités structurelles
 - II. Itération partielle au niveau d'un sous-système décomposé en plusieurs sous-systèmes fonctionnels
 - III. Itération locale au niveau d'une équation de description dans le cas où des paramètres structurels seraient liés à des paramètres fonctionnels.
- Une étape d'analyse et d'interprétation des résultats
- Une étape de choix et d'orientation autour des systèmes observés.

Autrement dit, la modélisation systémique consiste à réaliser une transcription ou représentation virtuelle d'une réalité concrète ou encore d'un modèle. La modélisation systémique s'opère en quatre étapes (Figure 32) :

- A. Définir le projet : qu'elles sont les frontières (découpage du système) et la finalité de l'étude ?
- B. Dessiner le modèle, à savoir identifier et à caractériser les éléments et les relations du système ;
- C. Déterminer le comportement du modèle qui se traduit par la mise en situation et l'expérimentation permettant une validation du modèle conçu ;

- D. Et enfin, l'utilisation du modèle qui correspond à une étape de simulation permettant d'évoluer dans des conditions réaliste et décisionnelles en faisant varier les paramètres de l'étude.

Nous nous appuyons donc sur une approche systémique pour formaliser la description de notre système d'étude à savoir le système de gestion des déchets.



Figure 32 : Étapes du processus de modélisation (source : HATIK, 2015)

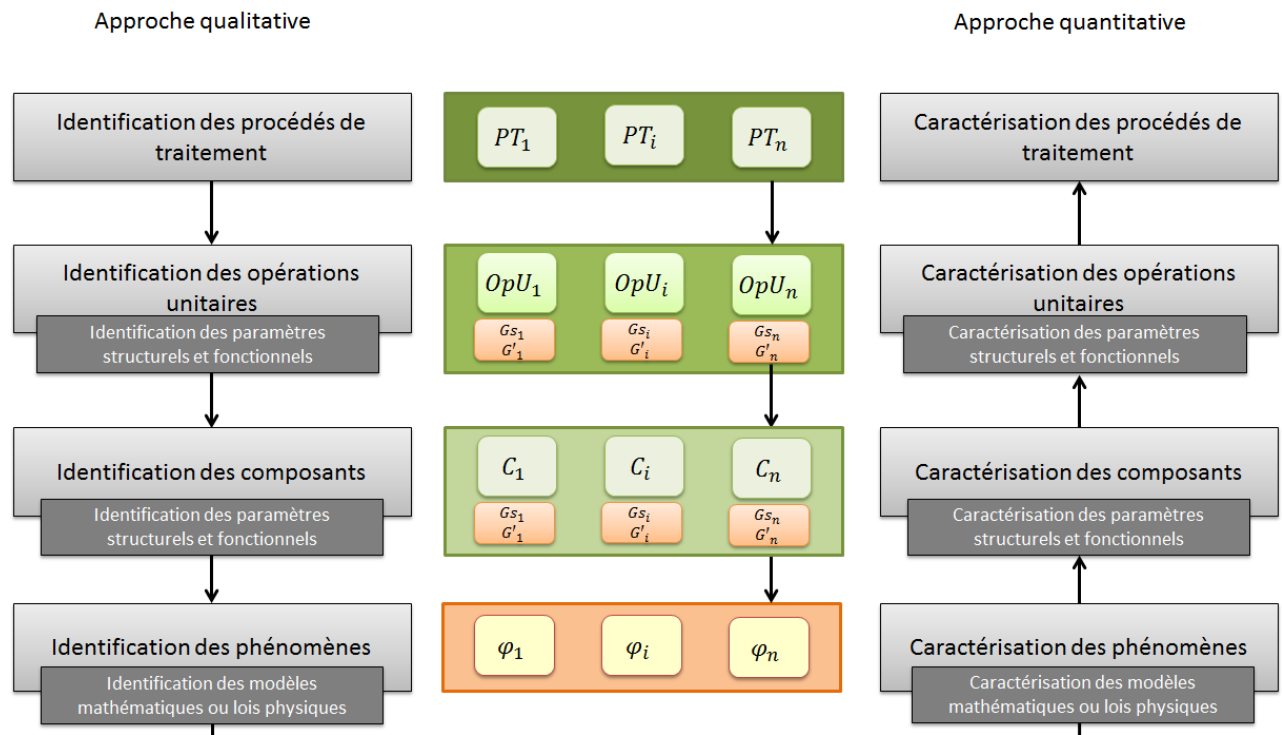


Figure 33 : Les étapes d'identification et de caractérisation des différents niveaux d'observation (source : HATIK, 2015)

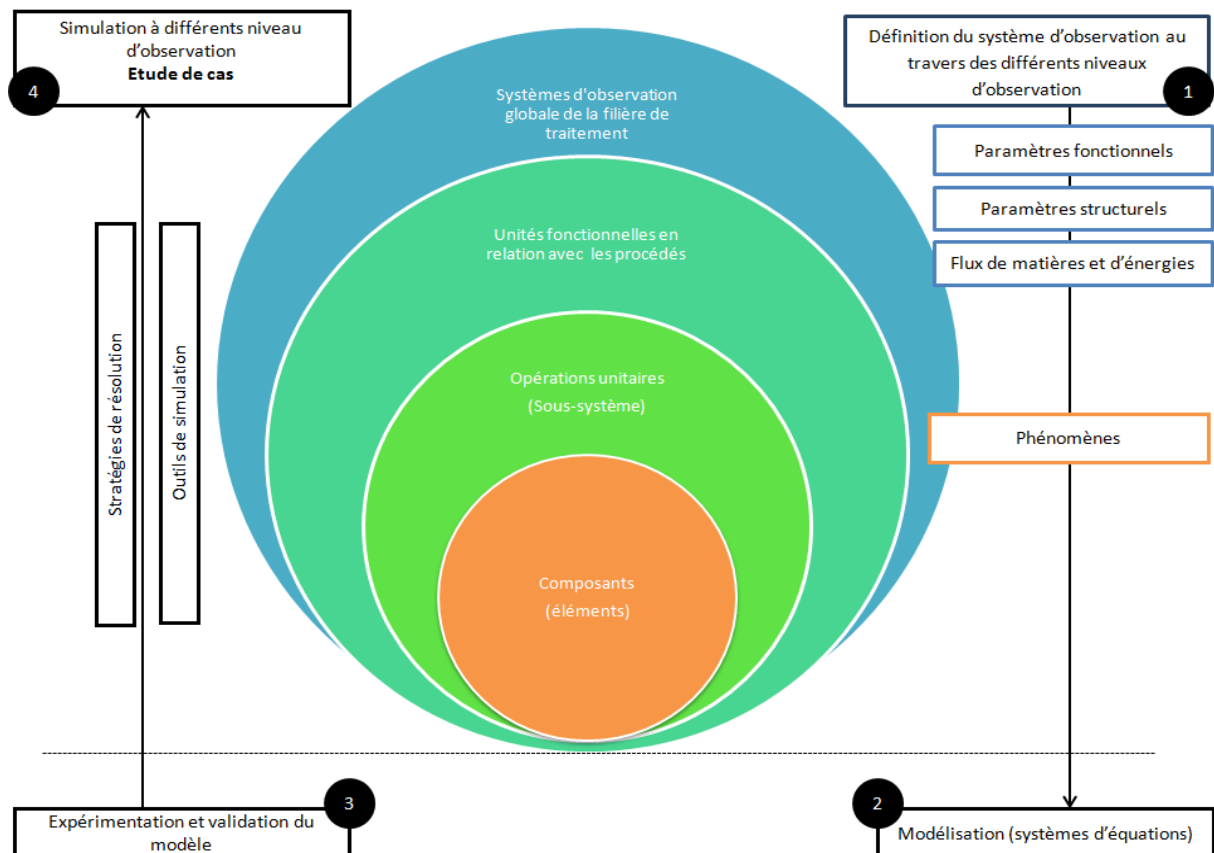


Figure 34 : Description générale de la démarche développée (source : HATIK, 2015)

II.5 **Projection : Appropriation et description générale de l'approche systémique développée**

Nous avons pu constater au cours des chapitres précédant que la « gestion des déchets » est en fait une terminologie englobant un certain nombre d'étapes, de paramètres et de transferts entre différents lieux et acteurs. Partant de cette constatation, il est possible de considérer la gestion des déchets comme un système complexe, c'est-à-dire composé de plusieurs éléments en interactions les uns avec les autres selon des actions, des modalités ou encore des fonctionnements différents. Comme nous l'avons vu l'approche systémique est une référence pour la description des systèmes complexes.

La démarche développée dans cette étude consiste à mettre en œuvre une phase de pré-modélisation nous amenant à **identifier** de la façon la plus pertinente les dispositifs de traitement en relation avec **l'ensemble de leurs éléments constitutifs** et de l'ensemble des actions (mécaniques, thermiques, chimiques, biologiques, biochimiques et physico-biologique...) mises en œuvre au sein de ces **procédés**. Nous chercherons également à décrire l'évolution des **matières convectées**.

Chaque procédé est considéré comme un système élémentaire, composé de sous-systèmes en liaison avec des opérations unitaires, le plus souvent associées à une seule action. A cette analyse qualitative d'identification succédera une pré-analyse quantitative de **caractérisation** nous amenant à présenter tous les **paramètres de descriptions structurelles et fonctionnelles** liés au système de traitement. Autour des actions mises en jeu, nous mettrons en évidence l'ensemble des **équations ou modèles en relation avec les phénomènes** observés (Figure 33).

L'objectif final de cette démarche méthodologique de description du système de gestion des déchets est de pouvoir élaborer et simuler des scénarios de gestion. Ces scénarios, nous permettrons d'analyser au travers de différents besoins (matières, énergétiques et autres) des solutions et alternatives possibles aux systèmes de gestion actuelle des déchets. La Figure 34 résume la démarche générale de modélisation.

II.6 **Définition des termes utilisés pour la démarche méthodologique**

Dans un objectif de clarté, nous avons souhaité, avant de poursuivre plus en détail, définir les termes utilisés tout au long de ce chapitre dans le but d'établir un langage commun. Les termes développés sont les notions et niveaux d'observation précédemment rencontrer dans le corps de texte souligné.

Système d'observation global : ensembles de systèmes en relation avec un objectif de traitement global d'un type de déchets (scénarios de traitement des déchets).

Procédés : Ensemble d'opérations qui permettent un objectif de traitement ou encore ensemble des opérations associées au système d'observation principal global composé d'un ou de plusieurs sous-systèmes autour d'opérations unitaires. C'est ce niveau d'observation qui sera défini comme une unité fonctionnelle.

Opération unitaire : traduit une action ciblée de traitement, le plus souvent, autour de phénomènes de même typologie, et relativement réduit en nombre. Les opérations unitaires constituent les sous-systèmes.

Composant ou éléments : c'est le dispositif de traitement le plus élémentaire que nous observerons. Il constitue le nœud d'observation détaillée autour de l'ensemble des flux en jeu.

Paramètres structurels : grandeurs décrivant les caractéristiques physiques ou géométriques des systèmes, des composants et des flux convectés.

Paramètres fonctionnels : grandeurs décrivant l'état des systèmes notamment ceux des flux convectés.

Modèles de description des phénomènes : Sont les équations physiques, les fonctions ou équations mathématiques ou encore des informations graphiques ou numériques reliant les paramètres structurels et fonctionnels des procédés.

Phénomène : manifestation élémentaire autour du comportement d'un objet d'étude ou du fonctionnement d'un système.

Autrement dit, chaque procédé de traitement des déchets est décomposé en opérations unitaires autour notamment d'objectifs de transport, de transformation, ou de stockage des entrants. Les interactions avec l'environnement sont également décrites. Autour de chaque opération unitaire et donc sous-systèmes, nous chercherons à cerner les paramètres structurels décrivant leurs caractéristiques physiques et géométriques et paramètres fonctionnels décrivant leurs états et flux identifiés.

Une fois toutes ces informations collectées, elles sont compilées dans le but de déterminer la structure du système étudié, à savoir comment s'organise les sous-systèmes entre eux (notion de relation) pour la modélisation. La modélisation qui s'appuie sur des modèles mathématiques et/ou phénoménologiques (lois physiques) des phénomènes en jeu et de leurs associations. Ces lois physiques ou modèles mathématiques expliciteront le plus souvent des équations de bilan de flux matières, d'énergie ou d'informations. Ils peuvent aussi traduire des comportements ou des caractéristiques des flux ou des systèmes élémentaires décrits.

III. Référence au cadre normatif

III.1 Introduction

Afin de mieux préciser le cadre dans lequel évoluent notre étude et la conception d'un outil de simulation, nous présentons ce que l'on appelle communément le cadre normatif en lien avec un contexte environnemental omniprésent dans la gestion des déchets.

L'observation du cadre normatif intervient à plusieurs niveaux dans notre étude.

III.1.1 **Etape de conception et de réalisation d'un outil de modélisation**

Notre outil de modélisation repose sur le même schéma explicitant l'analyse de cycle de vie. Sa conception devra donc permettre à tout opérateur de se situer par rapport au schéma normatif de référence, à la fois dans sa construction verticale où seront décrites, à différentes échelles d'observation, tous les sous-systèmes de description spatiale en relation notamment avec les procédés de traitement, et dans sa construction horizontale où seront explorés tous les indicateurs de caractérisations autour de chaque système et sous-système à différentes échelles d'observation.

III.1.2 **Détermination des indicateurs d'impact environnementaux**

Ces indicateurs concernent les impacts environnementaux pertinents, la caractérisation des flux de produit, la quantification de déchets et plus largement des sources de pollution. Leurs définitions, identifications et caractérisations se réfère au cadre normatif considéré autour de l'analyse de cycle de vie.

III.1.3 **Explicitation des facteurs d'émission pour le bilan carbone**

Dans la phase d'acquisition de donnée, il nous faudra également définir des facteurs d'émission pour le bilan carbone autour d'un périmètre d'étude clairement défini. Nous les évaluerons sur les mêmes bases que celles préconisées pour l'analyse de cycle de vie.

Le cadre normatif fait références à des normes correspondant à un ensemble de spécifications desquelles découle un principe servant de règles et de références techniques (AFNOR). L'intégration à ces normes est généralement volontaire et peut quelques fois faire l'objet d'obligation par l'intermédiaire de textes juridiques. Il existe tout un panel de normes établis dans divers domaines afin de proposer un **cadre commun d'évaluation**.

Ce cadre normatif est notamment régi par les normes ISO (International Organization for Standardization) qui propose des normes internationales dans les domaines du commerce et l'industrie. Elles renseignent sur les caractéristiques et les performances que l'on peut attendre d'un produit ou d'un service ou encore sur les tests à effectuer avant la sortie d'un produit ou la mise en œuvre d'un service, ou enfin le cadre d'une étude.

Tableau 18 : Synthèse des normes constituant le cadre de l'ACV

Normes	Contenus	Date
ISO 14 040	Description des caractéristiques et des bonnes pratiques de la réalisation d'une ACV	Octobre 2006
ISO 14 041	Définition de l'objectif, du champ de l'étude et l'analyse de l'inventaire	Décembre 1998
ISO 14 042	Détermination des principales spécificités de l'évaluation de l'impact du cycle de vie	Mai 2000
ISO 14 043	Précision des exigences et des recommandations pour l'interprétation des résultats	Mai 2000

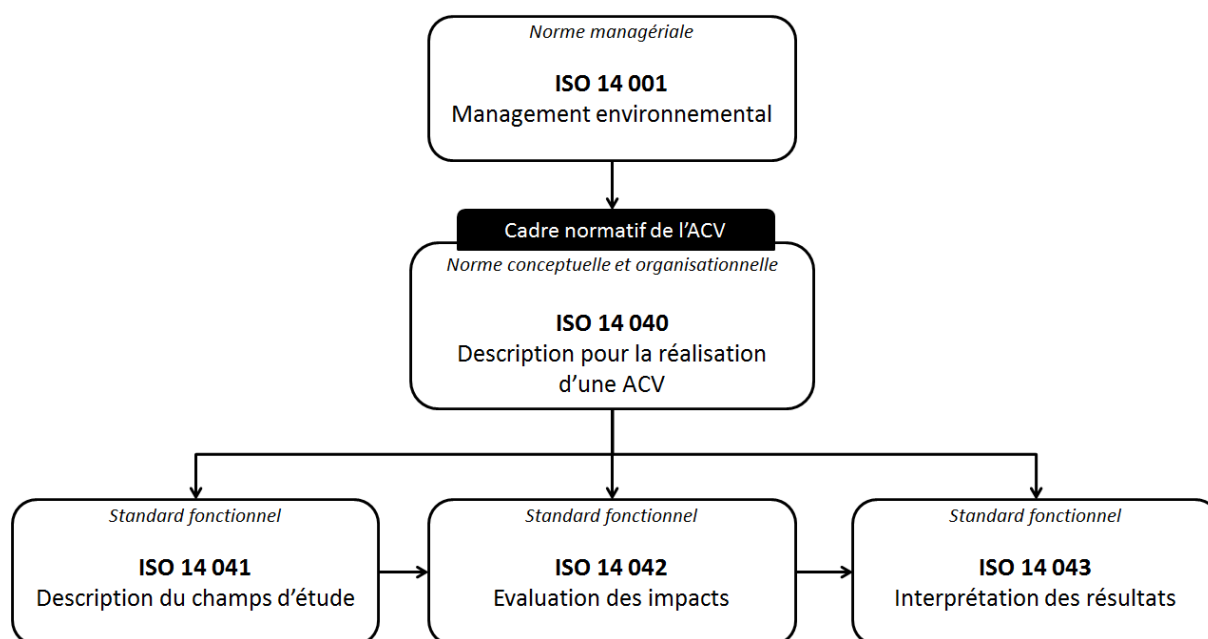


Figure 35 : Organisation des normes relatives à la mise en œuvre d'une ACV
(source : HATIK, 2015)

Nous nous basons plus précisément sur la série des normes ISO 14040 qui précise le cadre la conception et de la réalisation d'outil d'évaluation d'impacts environnementaux. Cette série initiée il y a une vingtaine d'années et structurée il y a une dizaine d'années comprend au final quatre normes ISO de 14040 à 14043 (Tableau 18).

L'ensemble de notre démarche, autour de la conception et de la réalisation de notre outil de simulation, s'appuiera donc sur ce cadre normatif.

III.2 Le contexte normatif

Au vu des points exposés et toujours dans un esprit de conformité, nous avons choisi de préciser la démarche scientifique « normée » par l'étude de l'outil « analyse de cycle de vie ? ». L'ACV constitue une méthode d'évaluation environnementale multicritères évoluant dans une série de normes ISO 14 040. Ce cadre normatif assure aux réalisateurs d'une étude la qualité et la fiabilité des résultats obtenus. Ce choix de coller à ce modèle d'évaluation est une base référentielle à la conception de notre outil global d'évaluation de scénarios. Car, il est important de ne pas perdre de vue nos objectifs à savoir concevoir et évaluer des scénarios de gestion des déchets afin de proposer une aide à la décision.

L'ACV constitue une méthode d'évaluation environnementale multicritères dont le but est dans notre cas d'évaluer les performances des différents systèmes de gestion des déchets. L'approche générale de l'ACV est de quantifier les impacts d'un produit depuis l'extraction de matières premières qui le composent jusqu'à son élimination en fin de vie, en passant par les phases de distribution et d'utilisation, soit du berceau à la tombe (ADEME, 2005) le tout selon un cadre normalisé ISO 14 040.

La norme ISO 14 040 présente les caractéristiques et les bonnes pratiques pour conduire une ACV de manière globale. Le détail de la méthodologie est ensuite développé dans 4 normes ISO comme schématisé dans la Figure 35. Cette série de normes permet la conduite d'une bonne étude ACV, un suivi de la qualité de l'étude et des résultats obtenus.

L'ACV examine donc les impacts environnementaux générés à chaque étape du cycle de vie d'un produit ou d'un service. Elle permet l'obtention d'éléments de réponses facilitant l'aide à la décision en vue du choix d'un projet à dimension environnementale par exemple.

C'est dans ce contexte environnemental que nous avons choisi de nous intégrer afin de cerner au mieux les méthodes et enjeux environnementaux pouvant être associé à notre étude. Dans cette partie, nous développons l'approche de cycle de vie et la méthodologie de conduite de l'étude pour ensuite l'appliquer au cas particulier de la gestion des déchets.

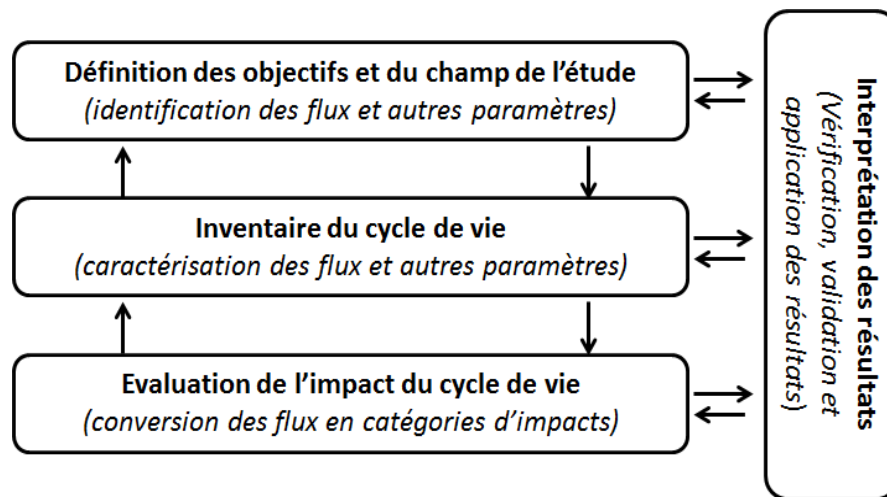


Figure 36 : Les étapes de l'Analyse du Cycle de Vie : le cadre méthodologique

III.3 Cadre normatif développée autour de l'ACV

III.3.1 Introduction à l'ACV

L'approche de cycle de vie consiste à prendre en compte l'ensemble des étapes de la vie d'un produit, d'un service ou d'un système de production depuis l'extraction des matières premières qui le composent jusqu'à son élimination en fin de vie (du berceau à la tombe), pour évaluer leurs conséquences sur l'environnement. Les étapes de cycle de vie d'un produit sont les suivantes :

- 1) L'extraction
- 2) La distribution
- 3) La fabrication
- 4) L'utilisation
- 5) L'élimination.

L'ACV va considérer tous les flux entrants et sortants du système de production étudié ainsi que tous les flux intermédiaires présents au sein des sous-systèmes.

Démarche méthodologique de réalisation de l'ACV

Pour mener à bien une ACV, quatre étapes sont nécessaires, à savoir la définition des objectifs et du champ d'étude, l'inventaire et la collecte des données, l'évaluation des impacts potentiels et l'interprétation des résultats. Cette démarche normalisée permet la transparence et la clarté des résultats pour une reconnaissance certaine (Figure 36).

La définition des objectifs doivent être très clairement explicités ainsi que l'orientation des résultats visés. En effet, l'ACV se qualifie de « goal dépend », c'est-à-dire que les résultats obtenus dépendent de l'objectif de départ. Cette définition précise, va permettre d'utiliser l'ACV comme outil de comparaison entre deux systèmes de même fonction, ici afin d'analyser les alternatives possibles de gestion voire même face au scénario de gestion actuel ou encore entre les différentes phases de gestion d'un système. C'est à ce stade que vont être décrits tous les paramètres du système et le système lui-même. Nous pouvons qualifier cette étape d'étape d'identification à l'image de notre démarche systémique.

L'inventaire ou encore la collecte de données constitue la phase d'acquisition de données sur le système. Après une phase d'identification présentée dans la description des objectifs, cette phase consiste en une étape de caractérisation des flux entrants et sortants du système mais également de tous les composants le caractérisant. L'inventaire est réalisé via une méthode itérative et se doit d'être exhaustif. Des données statistiques ou qualitatives peuvent également être associées aux flux comme la quantité maximale et minimale ou encore la composition...

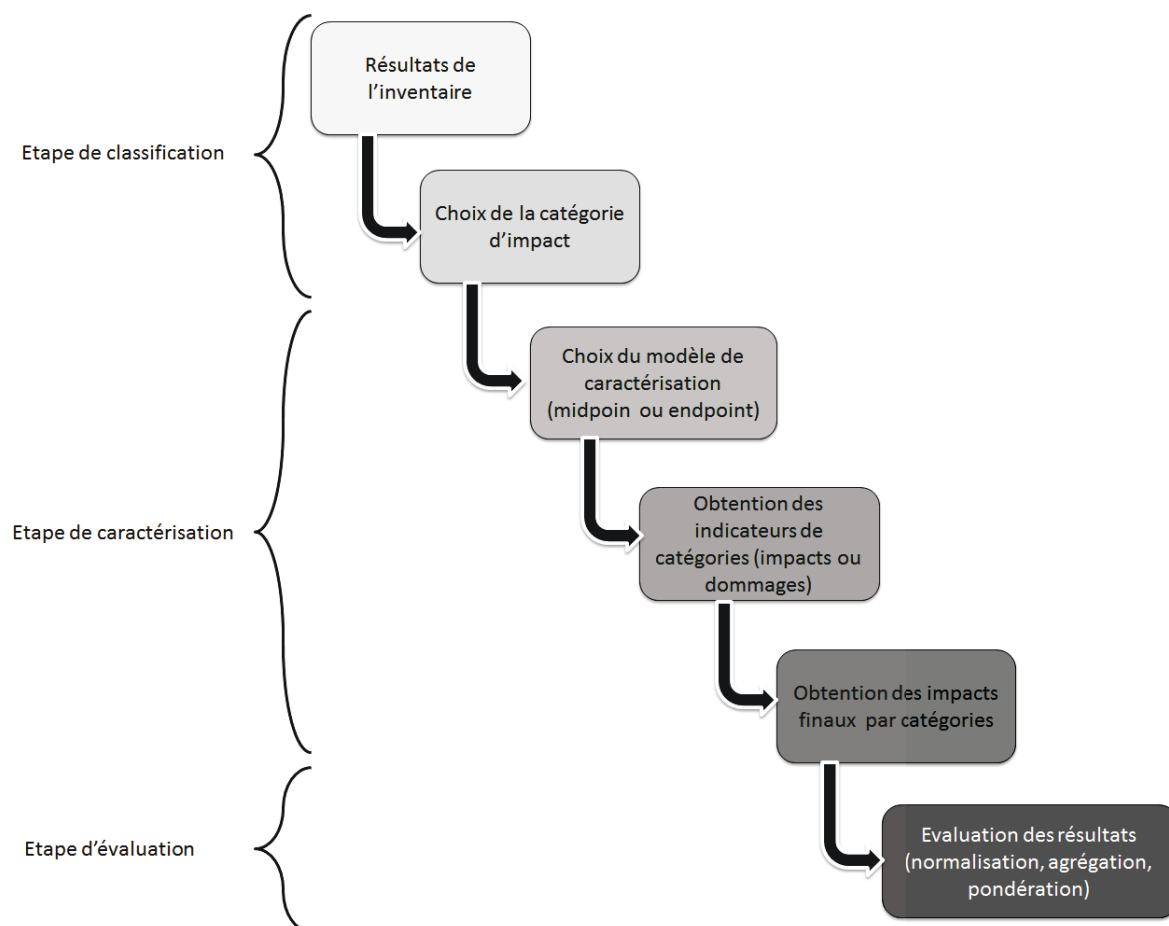


Figure 37 : Le déroulement de la méthode d'évaluation des données de l'inventaire (source : HATIK, 2015)

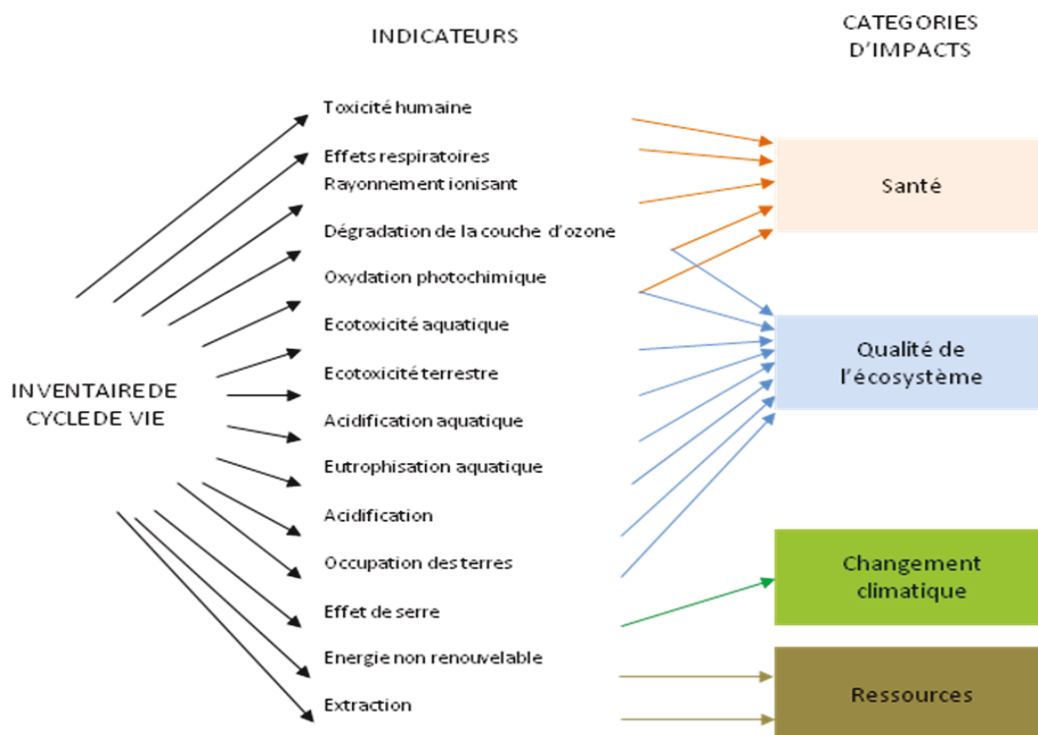


Figure 38 : La classification des catégories d'impacts environnementaux (source : SIMAPRO)

Une fois, l'inventaire réalisé pour tous les systèmes unitaires, les données sont agrégées pour obtenir l'inventaire général du système. Cette étape correspondrait partiellement, en projection dans notre démarche, à l'étape de caractérisation de la démarche systémique.

L'évaluation des impacts consiste à associer les données de l'inventaire à des impacts environnementaux spécifiques. Cette étape est également normalisée selon un cheminement précis en trois étapes :

1. Sélection des catégories d'impacts, des indicateurs de catégories et des modèles de caractérisation ;
2. Attribution des données de l'inventaire aux catégories d'impacts sélectionnées ;
3. Et calculs des indicateurs.

L'évaluation permet donc d'établir des grilles de valeurs basées sur un certain nombre d'indicateurs et se référant à une typologie de cibles. L'évaluation des impacts dans le cadre d'une ACV consiste à convertir les résultats de l'inventaire en impacts environnementaux mesurables. La Figure 37 expose la démarche générale d'évaluation des impacts et la Figure 38 les différentes catégories d'impacts considérés dans une ACV.

L'interprétation des résultats permet de mettre en exergue les résultats de l'inventaire et de l'étude d'impact et de les confronter aux objectifs et champs d'étude établis au départ. Cette approche est également normalisée selon la norme ISO 14 044 et se découle en trois étapes :

4. L'identification des enjeux significatifs vise à analyser les méthodes utilisées et les hypothèses formulées tout au long de l'analyse ainsi que les données de l'inventaire et les catégories d'impacts afin d'identifier leur implication au sein des résultats obtenus ;
5. L'évaluation des résultats par des analyses de sensibilité et de cohérence afin de s'assurer de la fiabilité des observations ;
6. Et la conclusion face aux objectifs de l'étude et rédaction du rapport.

La démarche méthodologique connue, il est important de visualiser l'ensemble des outils à disposition, leur application et leur approche afin d'atteindre l'objectif escompté : l'évaluation environnementale d'un projet.

Tableau 19 : Synthèse des logiciels ACV

Logiciels	Objectifs	Démarche	Cibles
SIMAPRO	Outil d'aide d'analyse des performances environnementales	Evaluation de l'empreinte carbone et de l'empreinte eau	Produits et services
BEES	Outil d'aide à la sélection des produits de construction respectueux de l'environnement préférentiellement rentables	Analyse des produits de construction par ACV : gestion acquisition à chaque étape cycle de vie Utilisation de la pondération Mesure la performance économique	Produits de construction et bâtiment
GEMIS	Outil d'analyse comparative des impacts environnementaux et financiers des systèmes d'énergie, de transport et de flux de matières	Quantifie les émissions de gaz à effet de serre à l'échelle territoriale	Produits de constructions et bâtiment
ELODIE	Outil pour quantifier les impacts environnementaux des bâtiments (émission GES, déchets générés, consommations d'eau...)	Evaluer la performance environnementale du bâtiment Contribution d'énergie et d'eau de l'ouvrage en exploitation ainsi que celle des chantiers	Constructions et bâtiment
GaBi	Outil d'aide à la décision pour la fabrication et le cycle de vie d'un produit ou d'un système	Modélise chaque élément d'un produit ou d'un système selon une approche cycle de vie	Ecoconception et construction
EcoBat	Outil de pré-dimensionnement permettant d'effectuer un écobilan d'un bâtiment	Modélise très rapidement un bâtiment et réalise un écobilan détaillé : calcul d'impact des installations, des constructions et des matériaux	Bâtiments et constructions
Bilan carbone ADEME	Evaluer et réduire les émissions GES engendrées par l'activité d'une entreprise de manière directe ou indirecte	Etude d'impact environnemental d'un produit (matériaux de fabrication, les procédés de fabrication, les moyens de transport, les sources d'énergie	Industrie, bâtiment, travaux publics (BTP)

III.3.2 **Focus sur les paramètres environnementaux à considérer dans une ACV ?**

Les paramètres environnementaux considérés dans une ACV sont divers et variés, ils concernent aussi bien les impacts sur l'air, l'eau ou encore le sol mais aussi les différentes nuisances existantes comme les odeurs et le bruit. La pollution du sol peut être entre autre quantifiée par la mesure des métaux lourds, des polluants organiques et/ou de la pollution engendrée par les déchets ; la pollution de l'air par les gaz à effet de serre, la diminution de la couche d'ozone, l'acidification... ; Et la pollution de l'eau par l'eutrophisation, les composés organiques carbonés ou les matières en suspension. En majorité, 88 % des études menées concernent le changement climatique, 70% le phénomène d'acidification et 60% le phénomène d'eutrophisation (Marchand, 2013).

D'autres paramètres peuvent être considérés dans une ACV comme la consommation des ressources naturelles renouvelables et non renouvelables, la production et la consommation d'énergie, la consommation de l'eau, la source et les installations de production d'énergie, les paramètres économiques ou encore les distances de transport, la quantité de déchets générée...

Le nombre de paramètres à considérer dans une ACV est très élevé, c'est pourquoi en moyenne une bonne analyse examine entre 5 et 10 indicateurs (). Mais afin que l'étude soit conforme au cadre normatif imposé par les normes ISO 14 040, elle doit s'acquitter d'une démarche transparente et reproductible. Il est cependant possible de réaliser une ACV basée sur un indicateur, dans ce cas, l'on parle d'ACV monocritère qui, par exemple, ne prennent en compte uniquement que l'aspect changement climatique. Il est vrai que ce type d'analyse restreinte peut biaiser les résultats dans une optique de prise de décision (Finnveden et Ekavall, 1998) mais peut s'avérer être utile dans certains contextes.

III.3.3 **Les outils d'application de la démarche ACV**

Il existe un certain nombre d'outil ACV chacun développé pour objectifs particulier d'analyse de cycle de vie. L'étude synthétique de ces outils, nous donne un aperçu des mises en application et de leur praticabilité. Cette observation, nous permet de faire des choix quant à la conception de nos outils de simulation et d'évaluation globale de scénarios. Parmi ces outils existants, nous pouvons citer BEES, GEMIS, ELODIE, SIMAPRO, GaBi, Ecobat et Bilan carbone. Une synthèse des objectifs, des démarches et des cibles de ces outils sont présentées dans le Tableau 19.

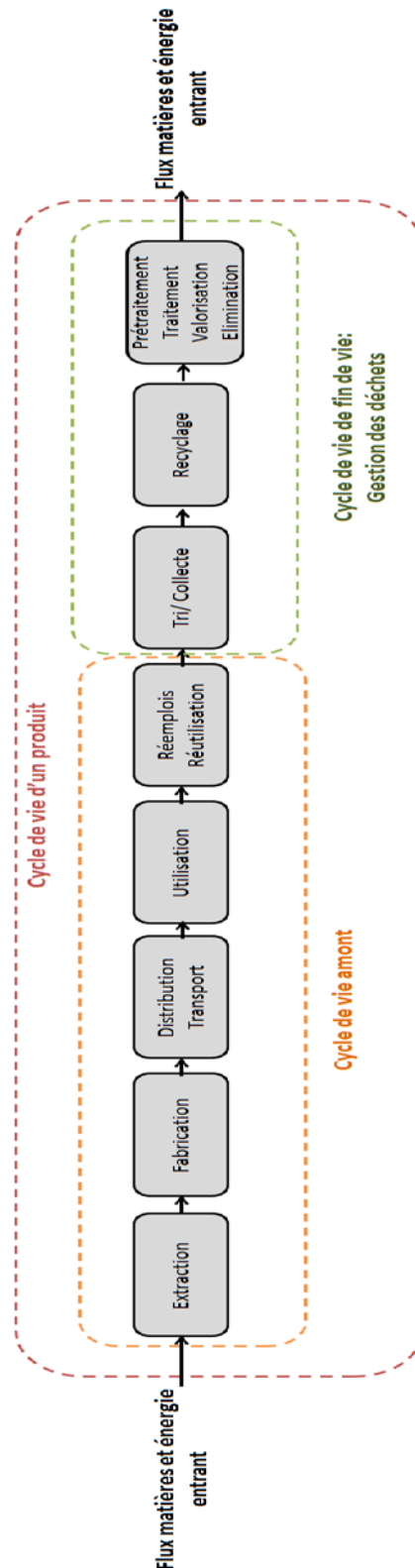


Figure 39 : Localisation de la gestion des déchets dans le cycle de vie d'un produit (source :HATIK, 2015)

III.4 **Cas particulier : Présentation du cadre normatif appliqué à la gestion des déchets**

III.4.1 **Les particularités de la méthodologie**

L'ACV appliquée aux déchets est couramment appelée « ACV déchets ». Elle consiste à évaluer les impacts environnementaux de la chaîne de gestion de la collecte à l'élimination et passant par le transport et le traitement. Elle examine donc les impacts à chaque étape de gestion en tenant compte de la nature du déchet, du procédé de traitement et de valorisation. Elle permet l'obtention d'éléments de réponses facilitant **l'aide à la décision** en vue du choix d'une filière de traitement la plus adaptée possible aux déchets, au territoire et aux intérêts environnementaux des valorisations permises.

Si l'on observe la chaîne de production et par conséquent le cycle de vie appliqué dans une ACV classique, nous pouvons constater que l'ACV déchets se situe en fin de chaîne appelé « fin de cycle ou fin de vie ». Le cycle de vie d'une ACV déchets commence dans ce cas dès que le produit devient un déchet et qu'il entre dans la chaîne de traitement. C'est donc au niveau de la définition des frontières du système que se fait la différence entre les deux méthodes. L'ACV déchets n'intègre par conséquent pas les émissions et autres paramètres des étapes précédentes. De ce fait, le déchet considéré entre dans le système avec une charge environnementale nulle (Figure 39).

L'ACV est un vrai outil d'aide à la décision dans le choix de filières de traitement de déchets. Elle permet d'avoir un regard critique de chacune des phases de gestion des déchets sur leurs impacts environnementaux. Les scénarios construits peuvent alors être classés et hiérarchisés facilitant ainsi la prise de décision. L'approche normative de cette méthode permet notamment la comparaison entre études réalisées et donc de différents scénarios et analyses conduites dans un même territoire. Il est possible par l'utilisation d'un tel outil d'obtenir des indications sur l'optimisation des collectes (distances, trajets...), des installations de traitement, prévoir les impacts engendrés par la mise en place d'un nouveau politique « déchet »...

Nous l'aurons compris l'ACV déchets est un outil d'évaluation environnementale de pointe permettant la sélection de scénarios de gestion des déchets dans, la comparaisons de filières de traitement de la plus respectueuse de l'environnement à la moins respectueuse ou encore sert de support à la prise de décision des politiques le tout dans un contexte au préalable définit. La littérature fait référence à un grands nombre études menées très variées (Chen et Christensen, 2010 ; Debeer, et *al.*, 2011 ; Hong, 2006 ; Larsen, 2010 ; Manfredi, 2009 ; Martinez-Blanco, Munoz, et *al.*, 2011 ; Peter, 2009, Riber, 2010 ; Rowley, 2009 ; Toller, et *al.*, 2009 ;) Les études peuvent considérées plusieurs types de déchets, plusieurs procédés de traitement, considérer la chaîne entière de gestion ou simplement quelques-unes d'autres elles... (Marchand, 2013).

Tableau 20 : Synthèse des logiciels d'ACV appliqués à la gestion des déchets

Logiciels	Objectifs	Démarches	Références
WISARD	Outil d'évaluation et de comparaison des performances environnementales de différents scénarios de gestion des déchets ménagers	Modélisation du cycle de vie des filières de traitement et de valorisation des déchets.	Eco Bilan, ADEME, Eco-Emballage
ORWARE	Outil d'évaluation environnemental des systèmes de traitements des biodéchets	Basée sur l'analyse des flux des matières (MFA) et de l'ACV	KTH, IVL, JTI et Environmental Engineering
EASEWASTE	Outil d'évaluation environnementale des systèmes et des technologies de gestion des déchets solides	Basée sur l'analyse des flux des matières (MFA) et de l'ACV	Technical University of Denmark
MSWI model	Outil de bilan des flux d'incinération	Calcule les entrants/sortant de production pour des usines d'incinération de déchets solides, basées sur la composition élémentaire et sur la disposition d'usine	
WAMPS (Waste Management Planning System)	Outil de sélection pour évaluer les aspects environnementaux et économiques de différentes stratégies de gestion des déchets	ACV avec intégration d'analyses économiques et comparaison d systèmes de gestion des déchets	
WRATE (Waste and Resources Assessment Tool for the Environment)	Outil d'évaluation environnementale des process de gestion des déchets	Basée sur une analyse des impacts sur le changement climatique, l'acidification, eutrophisation et formation photo-acide appliquée à la région Baltique	IVL Swedish Environmental Research Institute

Marchand a mené une bibliométrie sur 12 ans de 1998 à 2011 montrant l'évolution du nombre de publications sur l'ACV déchets traduisant une vraie prise de conscience de la nécessité d'intégrer les aspects environnementaux aux nouveaux projets et notamment dans la gestion des déchets (Marchand, 2013).

Dans le cadre d'une ACV et donc d'une évaluation environnementale, il semble important observer les impacts mesurer et par conséquent le flux considérés dans l'analyse.

III.4.2 Caractéristique des outils existants pour l'ACV des déchets

Il existe quelques logiciels d'ACV déchets dont les principaux sont ORWARE et EASEWARE qui constituent des logiciels à destination des chercheurs basés sur l'analyse du système environnemental de la gestion des déchets. Ils s'appuient sur les flux de matières, les impacts environnementaux (GES, acidification, eutrophisation...) et l'analyse des coûts. La méthode consiste à proposer un modèle composé de plusieurs sous modèles chacun décrivant un process intégré dans un réel système de gestion des déchets (Eriksson, 2002, Fliendner, 1999, Björklund, 1998).

L'objectif principal de ces logiciels est majoritairement l'intégration des impacts environnementaux dans la gestion des déchets. Certains vont être plutôt orientés sur les technologies (MSWI model) tandis que d'autres sur les flux de déchets (ORWARE, EASEWASTE) ou encore d'autre seront plus généralistes en n'ayant une vision globale intégrant tous types de déchets et de stratégies environnementales.

C'est dans une optique de globalisation entrant pleinement dans une approche systémique que nous avons souhaité développer un outil de simulation de scénario de gestion des déchets considérant tous types de déchets et tous types de procédé de traitement. Dans le cadre de l'étude, nous avons souhaité approfondir l'outil sur un exemple de traitement des déchets ménagers afin de cibler la problématique locale (collecte multi-matériaux). L'outil prendra donc en compte des facteurs environnementaux, l'analyse des flux et les paramètres économiques le tout selon une approche normative et systémique.

III.4.3 Les limites de l'ACV déchets

Les limites identifiées sont principalement liées aux hypothèses de modélisation et d'évaluation des impacts (Marchand, 2013). Dans le cadre d'une ACV déchets la question récurrente de la prise en compte du carbone biogénique (Christensen, Bhandar, et al, 2007), des impacts évités, de l'évaluation des impacts (globaux et locaux), du choix de la méthode de caractérisation et donc de la fiabilité des résultats du à une forte incertitude est soulevée.

Comme nous avons pu le voir, la définition du système est très importante car selon les frontières le résultat peut être complètement différent (Zhao, Der Voet, et al, 2009). Par ailleurs, l'ACV déchets considère des impacts évités qui sont liés à la production de nouvelles énergies ou produits ayant une plus-value.

Ces impacts évités sont donc déduits des émissions générales de l'installation de traitement réduisant ainsi l'effet à cette échelle. L'installation de traitement pourrait avec ce système de comptage obtenir un score d'émissions faibles face à la réalité

des impacts générés. A ce même niveau l'attribution des bénéfices environnementaux de la production d'une énergie ou d'un produit peut se trouver impacté à une échelle territoriale au lieu de locale. La prise de décision favorisant souvent l'échelle locale est alors faussée par l'agrégation des données d'émissions.

III.5 Projection développée autour de l'ACV appliquée à la gestion des déchets

L'ACV comme précisée constitue un cadre méthodologique notamment autour des normes ISO 14040. Ce cadre définit une méthodologie d'approche d'évaluation des impacts environnementaux qui constitue un volet important à considérer et à développer dans l'analyse de scénarios de gestion des déchets. Nombreux sont les impacts à inventorier dans une ACV multicritères. Néanmoins nous ne nous intéressons qu'à une certaines catégories d'impacts liées aux émissions de gaz à effet de serre. En effet, les déchets et principalement les biodéchets libèrent du méthane lors de leur décomposition par les microorganismes, or le méthane est 21 fois plus polluant que le dioxyde de carbone. De plus, les modes de traitement plus couramment utilisés pour la gestion des déchets sont l'incinérateur et les ISD qui présentent des risques importants d'aggravation de l'effet de serre. Le facteur émission atmosphérique est particulièrement intéressant à prendre en compte. Il n'est pas plus important que les autres facteurs d'impacts mais il retient toutefois notre attention et notre volonté de l'intégrer à l'étude.

C'est par le biais de l'outil Bilan Carbone que nous considérons ces émissions. Cet outil permet la mesure des émissions de gaz à effet de serre selon encore une fois une démarche approuvée venant à nouveau renforcer le cadre de l'étude. Cette méthode met en exergue les émissions qu'elles soient directes ou indirectes d'une activité, d'un site ou encore d'un flux matière ou énergie. Les émissions directes constituent les émissions propres aux activités, aux sites ou encore aux flux avec une notion de propriété à l'entreprise par exemple. Les émissions indirectes correspondent aux flux comme la production d'électricité, de chaleur ou de vapeur importés pour le fonctionnement de l'entreprise ou encore les émissions dues à la production de déchets et de sous-produits ne constituant pas l'activité principale de l'entreprise. Il est également possible par cette méthode de comptabiliser les émissions évitées par l'utilisation ou la production d'énergie renouvelable ou encore de compost comme l'on peut en produire par le traitement des déchets.

Par l'outil bilan carbone qui correspond à une ACV monocritère, nous pouvons montrer l'efficacité des scénarios de gestion proposés d'un point de vue environnemental appliqué aux émissions de gaz à effet de serre. L'intégration d'un tel objectif dans l'élaboration des scénarios de gestion apporte un support supplémentaire dans le processus de prise de décision qui s'en trouve argumenté. Nous l'aurons compris la prise en compte des facteurs environnementaux autour des émissions atmosphériques dans l'élaboration de nouveaux systèmes de gestion des déchets est primordiale.

Le volet environnemental sera donc développé selon une approche analyse de vie monocritère approché par la méthode Bilan Carbone par l'intégration des facteurs d'émissions à chacun des niveaux d'observation, des activités, des sites de traitements, des composants, des flux et des opérateurs (activité humaine).

Afin de conclure ce chapitre, il semble important de cibler les typologies observées au cours de l'étude dans un objectif d'encrage dans l'approche méthode développée et considérée.

IV. L'approche typologique

IV.1 Introduction à l'approche typologique

Nous cherchons à **décrire un système** dans un objectif de **modélisation et de simulation**. Afin de simplifier cette description, car rappelons que le processus de modélisation passe pas une phase de **simplification** de manière à mieux appréhender le modèle. Il nous est donc possible au cours des différentes observations de retrouver des similitudes au sein des sous-systèmes, des éléments ou encore des flux convectés. Ces caractéristiques spatiales, structurelles ou fonctionnelles, nous permettent d'établir des regroupements sous formes de typologies. La typologie pouvant être traduite par la « *Science de l'analyse et de la description des formes typiques d'une réalité complexe, permettant la classification* » (Julia, 1984).

Les typologies mises en œuvre sont élaborées dans une optique de simplification dans la démarche descriptive du système de gestion des déchets. Ces simplifications par le biais de typologies peuvent être observées à plusieurs niveaux. Ces typologies concernent donc: la configuration spatiale, la configuration structurelle, la configuration fonctionnelle, les flux de matières et d'énergie, et des procédés de traitement. Cette partie s'attache donc à présenter les typologies identifiées au travers de ces niveaux (Figure 40).

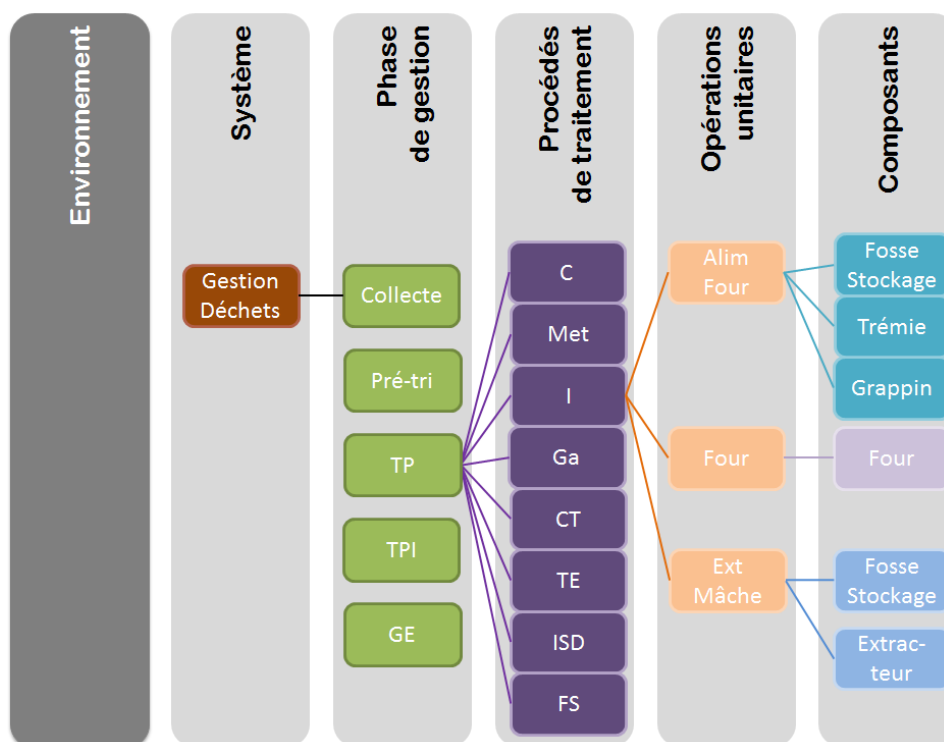


Figure 40 : Description de l'approche systémique et typologique au travers des niveaux d'observation (source : HATIK, 2015)

IV.2 Présentation des typologies

IV.2.1 Typologie spatiale

Les typologies spatiales représentent les niveaux d'observation spatiale. Ils correspondent aux différents étages de découpe du système. En amont du système global, nous retrouvons l'environnement. Et en aval, nous nous attachons à observer les phases de gestions, les procédés, les opérations unitaires ou sous-systèmes et les composants.

Les procédés liés à un objectif de traitement sont organisés en opérations unitaires ayant chacune une action ciblée de traitement qui se décomposent en composants ou éléments assimilés aux appareils de fonctionnement du système. Les phases de gestion représentent toutes les étapes spatiales d'acheminement du déchet à son traitement ultime.

IV.2.2 Typologie des flux matières

Les flux matières considérés sont essentiellement les déchets convectés au sein des procédés, des sous-systèmes et des composants. Comme nous avons pu le voir dans le chapitre introductif les déchets sont de différentes natures et origines chacune donnant déjà lieu à une nomenclature. Les typologies de déchets retenues ici sont liées aux procédés de traitement et par conséquent à leur caractère valorisable ou pas comme suit : les déchets résiduels, les déchets recyclables et les déchets organiques.

Au cours de l'observation des typologies, nous avons également pu constater que les déchets subissent des transformations donnant lieu à d'autres flux matières. Nous avons choisi d'appeler ces flux les produits induits qui à l'image de la typologie des déchets peuvent être classés en fonction de leur caractère valorisable. Respectivement, les déchets et les produits induits constituent les entrées et sorties du système.

IV.2.3 Typologie des flux énergie

Les flux d'énergie sont variés mais dans un cadre de simplification, nous nous référons aux énergies que nous pouvons classer comme « flux de réseaux de distribution » (Rakotonarivo, 2013). Ces flux de réseaux de distribution font appel à l'énergie électrique, au gaz, au carburant et à la vapeur.

D'autres flux ou paramètres d'observation peuvent être étudiés autour de coûts notamment de production de l'énergie et des recettes de leur vente mais également des impacts environnementaux principalement liés au bilan carbone. Ces mêmes paramètres sont développés pour les flux matières.

IV.2.4. Typologie structurelle

Les paramètres structurels examinent les données liées au dimensionnement du composant comme la capacité de traitement ou de stockage qui fait appel à la connaissance de la forme géométrique du contenant, la puissance installée et le rendement.

IV.2.5 **Typologie fonctionnelle**

Les paramètres fonctionnels correspondent aux données liées au fonctionnement propre de l'unité et par conséquent liés au flux autours notamment des débits matières (déchets et produits induits) et énergétiques (vapeur et gaz) ou encore de fonctionnement (températures, pressions...).

D'autres paramètres complémentaires sont pris en compte comme les quantités et les caractéristiques physiques des flux (composition et PCI) ou encore l'emprise au sol des procédés.

IV.2.6 **Typologie des procédés**

Les procédés de traitement ont des objectifs de traitement différents qui selon leur nature permettent l'élaboration de typologies principalement en relation avec les actions qui y sont engendrées. Nous en considérons trois : les procédés thermiques, biologique-biochimiques, physico-chimiques, de stockage et de transport.

V. **Conclusion**

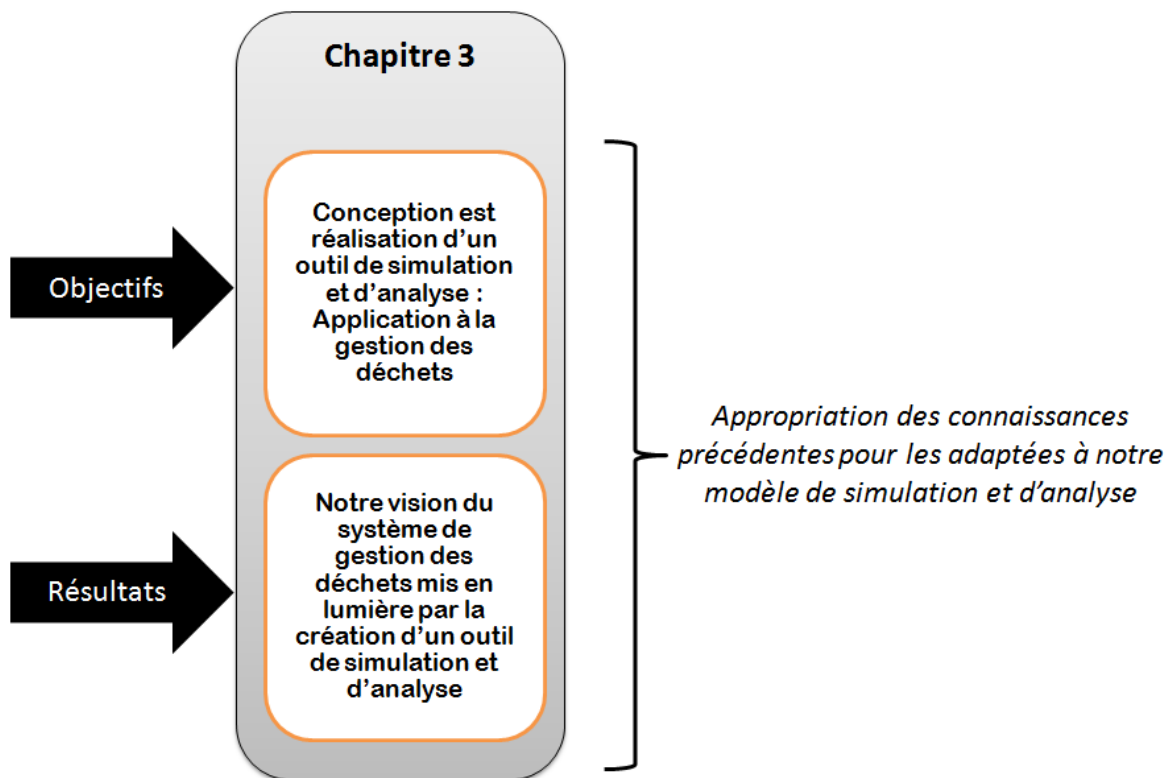
La gestion des déchets est un vaste programme s'articulant autour de beaucoup de notions notamment structurelles, fonctionnelles, de caractérisation de flux, de réglementations et de décisions politiques. Tous ces paramètres en font un système complexe à observer et à définir. Néanmoins par une approche systémique considérant les petits tous dans des grands tous, il est possible de dégager un certain nombre d'informations qui conduisent à une description méthodique et adaptée du système. En effet, la complexité du système fait qu'il est facile de se perdre dans un labyrinthe de flux et de connexions. C'est ce que ce chapitre s'est attaché à expliciter par la symbolique de la flèche et de la cible. La méthodologie décrit simplement le chemin à parcourir pour que la flèche puisse atteindre son objectif. Afin de mener à bien ce cheminement scientifique, des balises ont été nécessaires au travers d'un cadre normatif ISO 14040 définissant ainsi les étapes de la méthode. L'approfondissement de ces démarches a pu être approprié à l'aide des outils existants comme l'ACV et de ses logiciels ou encore le Bilan Carbone. Outre ces outils, il est également nécessaire d'observer des typologies à différents niveaux d'observation pour organiser les observations et ainsi de les regrouper avec un objectif de simplification du modèle.

En effet, comme présenté en introduction du présent chapitre, les méthodes de simulation sont précédées d'une étape de modélisation ayant pour but de simplifier au maximum le système d'observation. La modélisation passe par l'utilisation de modèles mathématiques permettant d'appréhender le fonctionnement et la structure du système dans son ensemble afin de prévoir ses paramètres d'état. C'est en tenant compte de tous ces facteurs que s'effectue la conception de l'outil de simulation. Cet outil de simulation ayant pour but de décrire un système de gestion des déchets selon une approche systémique composée de plusieurs niveaux d'observation. Chacun de ces niveaux s'attache à décrire les procédés de traitement, les flux et les composants présentant avec la nécessité de répondre à un besoin fondamental de production d'énergie.

Le chapitre 3 présente par conséquent toutes les phases de conception et de réalisation de l'outil de simulation par la description du cadre normatif, des niveaux d'observation et des indicateurs d'évaluation. A terme, cet outil servira de support à l'élaboration de scénarios de gestion et d'aide à la décision autour des questions économiques et environnementales.

Chapitre 3

Conception et réalisation d'un outil de simulation de gestion et de traitement des déchets



Sommaire

I. Introduction	172
II. Conception d'un outil de description et de simulation d'un dispositif de gestion et de traitement des déchets.....	173
II.1 Définition des termes utilisés pour la démarche méthodologique.....	173
II.2 Description générale de l'outil de simulation	176
II.3 Le choix du modèle : Description des sous-niveaux	176
II.4 Identification des flux et de leurs paramètres de description.	180
II.4.1 Les paramètres de gestion.....	182
II.4.2 Les paramètres de procédés	182
II.4.3 Les paramètres d'identification des flux matières et énergies.....	184
II.5 Description du système global d'observation	184
II.6 Description des Unités fonctionnelles, des Opérations Unitaires et des composants	188
II.6.1 Unités Fonctionnelles de Collecte et transport.....	188
II.6.2 L'Unité Fonctionnelle de pré-tri et prétraitement.....	192
II.6.2.1 L'Opération Unitaire de prétraitement biologique	194
II.6.2.2 L'Opération Unitaire de Tri mécanique.....	196
II.6.3 L'Unité Fonctionnelle de traitement des déchets primaires.....	198
II.6.3.1 L'alimentation du four	200
II.6.3.2 L'Opération Unitaire de combustion des déchets.....	202
II.6.3.3 L'Opération Unitaire d'extraction des mâchefers	204
II.6.4 L'Unité fonctionnelle de traitement des produits induits	206
II.6.4.1 L'Opération Unitaire de production de vapeur d'eau	208
II.6.4.2 L'Opération Unitaire de production d'électricité	210
II.6.4.3 L'Opération Unitaire de traitement des fumées	212
II.7 L'Unité Fonctionnelle de gestion des extrants	214
III. Réalisation de l'Outil de simulation.....	217
III.1 Explicitation d'un scénario de gestion et de traitement autour des typologies de déchets et des modes de traitement	220
III.1.1 Le choix des déchets à traiter.....	220
III.1.2 Le choix du mode de traitement	220
III.2 Identification et Explicitation du système global d'observation ou filière de gestion et de traitement	222
III.3 Identification et Explicitation des Unités Fonctionnelles SS1i.....	224
III.3.1 UF1 : La collecte et le transport.....	224

III.3.2	UF2 de Traitement Pré-tri et prétraitement	224
III.3.3	UF3 de Traitement des déchets primaires	226
III.3.4	UF4 de Traitement des produits induits	226
III.3.5	UF5 de Gestion des extrants	226
III.4	Identification et Explicitation des Opérations Unitaires	228
III.5	Identification et caractérisation des composants	230
III.6	Explicitation des pages d'acquisition de données.....	230
III.6.1	L'acquisition de données à l'échelle des composants	231
III.6.2	Présentation des résultats au travers des sorties graphiques	234
III.7	Exemple de navigation et d'acquisition de données au travers de l'UF d'incinération.....	238
IV.	Conclusion.....	243

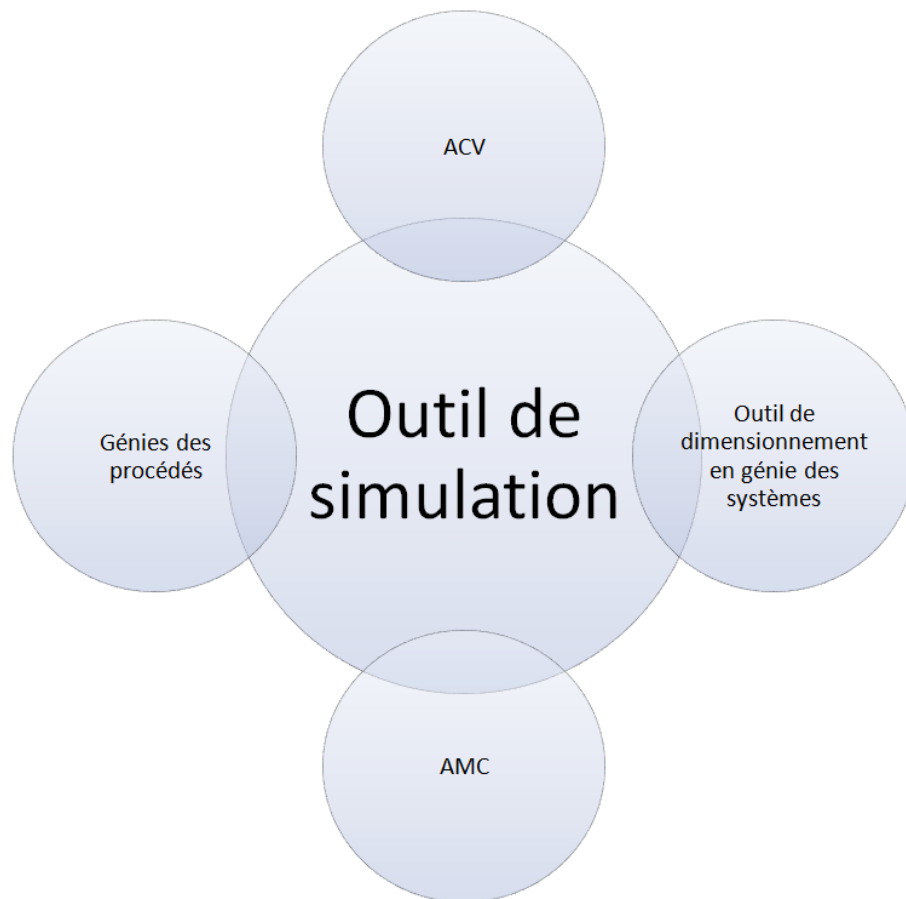


Figure 41 : L'environnement de l'outil de simulation (source : HATIK, 2015)

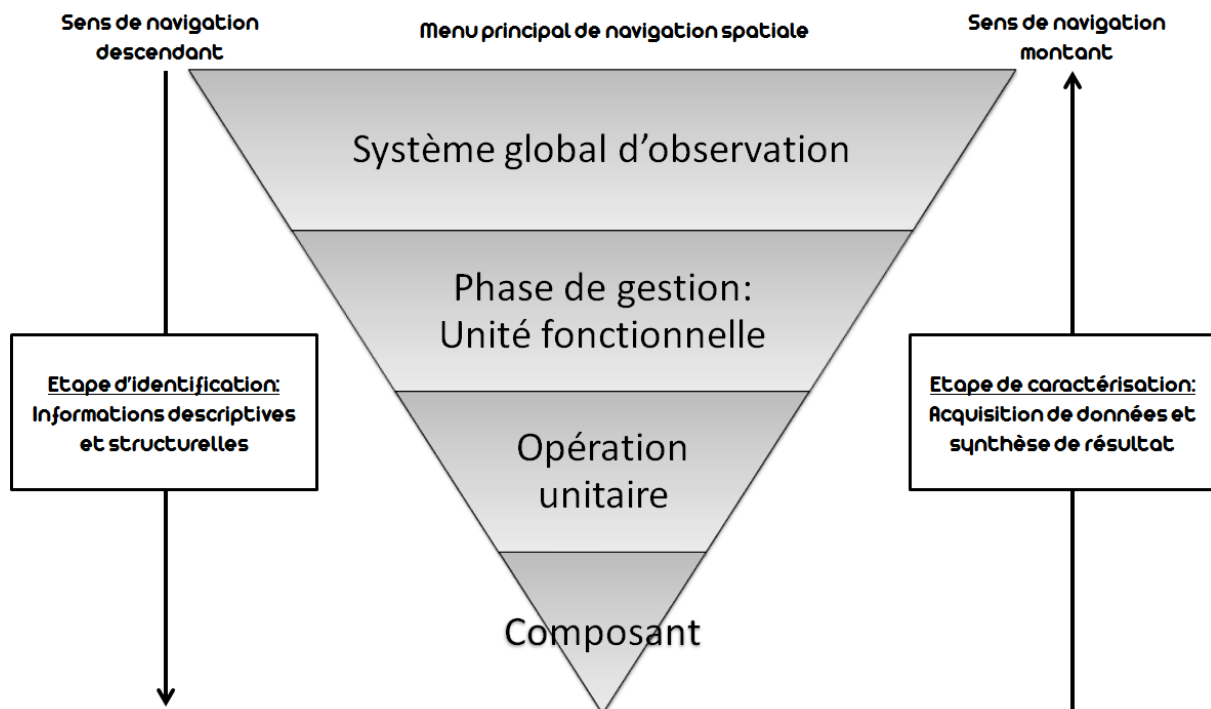


Figure 42 : Echelle d'observation et navigation au sein de l'outil de simulation (source : HATIK, 2015)

I. Introduction

La conception et la réalisation de l'outil de simulation de gestion des déchets a pour vocation de faciliter la mise en place de scénarios. Cet outil permet par une analyse systémique, une approche à la fois globale et détaillée d'un système de gestion des déchets au travers de différents niveaux d'observation. Ces niveaux d'observation ont été pensés afin d'être au plus près de la réalité, du plus général au plus élémentaire. A chaque passage d'un niveau à un autre, des informations synthétiques à la fois descriptives et structurelles sont présentées.

La navigation est conçue selon un principe de navigation dite « descendante » et « montante ». La navigation descendante consiste à présenter les différents niveaux d'observation du système selon une étape d'identification d'une part descriptive et d'autre part structurelle. Des informations simplifiées seront renseignées autour de données générales sur le fonctionnement des sous-systèmes observés. Cette navigation se poursuivra jusqu'à atteindre l'échelle d'observation la plus élémentaire, nous situant au niveau du composant. C'est à cette dernière échelle que s'effectue l'acquisition de données détaillées que nous considérerons comme par une étape de caractérisation des flux de matières et d'énergie. A partir de cette acquisition de données, nous procéderons à une navigation montante pour intégrer à des niveaux de description « supérieures », les informations présentées à un niveau élémentaire. Lors de la navigation montante, une synthèse des résultats obtenus par niveau d'observation est présentée.

Nous avons conçu le niveau élémentaire du composant selon les objectifs visés pour l'élaboration de paramètres d'évaluation. Par conséquent, la notion de composant et donc de niveau élémentaire est propre à l'observateur. De ce fait, nous avons considéré ce niveau selon une approche arbitraire qui peut aisément être remise en question. Autrement dit certains composants identifiés comme tel, pourraient être encore décortiqués en sous-composants selon une approche purement génie des procédés. Mais comme précisé en début d'introduction, l'outil ne se positionne pas intégralement dans cette optique mais dans une approche de gestion systémique. Le but étant de proposer un panel de paramètres d'observation des flux liés aux procédés et aux composants afin d'évaluer le scénario construit.

L'outil nécessite cependant l'apport de plusieurs autres disciplines comme l'ACV, l'analyse des flux en génie des procédés ou encore des outils de dimensionnement des structures et des composants autour de considérations technologiques. Tous ces apports extérieurs sont possibles et pris en compte dans la conception de l'outil afin de le compléter. Une fois les scénarios construits, ils pourront être évalués par une interphase annexe à l'outil permettant l'aide à la décision par l'analyse multicritères. Cette analyse multicritères s'appuie sur les paramètres et indicateurs déterminés et calculés au sein de l'outil. L'évaluation finale favorise également la synthèse des résultats obtenus précédemment permettant à l'utilisateur de faire un choix en connaissance de cause. L'avantage d'un tel outil est la simulation par la variation des données et donc des résultats pouvant ainsi agrémenter la prise de décision.

II. Conception d'un outil de description et de simulation d'un dispositif de gestion et de traitement des déchets.

II.1 Définition des termes utilisés pour la démarche méthodologique

Dans un objectif de clarté, nous avons souhaité, avant de poursuivre plus en détail, définir les termes utilisés tout au long de ce chapitre dans le but d'établir un langage commun. Les termes développés sont les notions et niveaux d'observation précédemment rencontrés dans le corps de texte souligné.

Système d'observation global :

Il nous faut ici définir le système global d'observation autour de la gestion et du traitement d'un déchet donné et des sous-systèmes qui composent à différentes échelles ce système global.

Un scénario est composé de différentes alternatives de traitement et de gestion des déchets. Nous ne nous positionnerons pas à ce niveau d'observation pour développer un outil de simulation. Ce niveau d'analyse est intégré dans un chapitre ultérieur consacré à l'étude des scénarios. Les différents scénarios s'appuient sur différents modes de traitement que nous dénommerons également des filières de traitement avec des objectifs de traitement clairement établis pour un type de déchet donné. Autour, par exemple, des déchets ménagers, nous identifions d'abord des modes de traitements possibles : méthanisation, compostage, incinération, enfouissement, gazéification, traitement enzymatique. Nous choisirons un des modes de traitement possible pour nous positionner dans une filière de traitement. Chacune de ces différentes filières constituera le système global d'observation, point de départ de nos descriptions et analyses dans un outil de simulation.

Unités Fonctionnelles :

La filière de gestion et de traitement étant définie, une analyse hiérarchique nous amène à définir des phases de traitement qui sont quasiment identiques pour toutes les filières de traitement. Nous identifierons ainsi, une phase de collecte et de transport, une phase de pré-tri et de prétraitement, une phase de traitement des déchets primaires, une phase de traitement des produits induits, et une phase de gestion des extrants. Ces différentes phases n'existent pas de manière explicite pour l'ensemble des déchets et des filières de traitement. Il est néanmoins intéressant de les explorer de manière systématique pour toutes les situations. Nous associerons les phases de gestion à des **sous-systèmes** du système global d'observation (**SS1**) que nous dénommerons Unités Fonctionnelles. Autrement dit nous associerons aux phases de gestion des entités physiques ayant une structure et un fonctionnement. Nous observerons donc ces entités physiques comme des sous-systèmes en interaction autour de flux matière et d'énergie, voire d'information. Ces unités fonctionnelles sont associées le plus souvent à des infrastructures diverses ou des bâtiments qui sont le siège d'opérations de transformation, de stockage, de transport, plus généralement d'actions physiques, chimiques, biochimiques, thermiques, etc.

Opérations Unitaires (SS2) :

Les Unités Fonctionnelles sont donc l'objet de plusieurs opérations que nous regrouperons en **sous-systèmes** cohérents de niveau inférieur (**SS2**). Nous les nommerons Opérations Unitaires. Derrière ce vocable nous désignerons une entité physique possédant un aspect structurel et fonctionnel. Par exemple, dans l'Unité Fonctionnelle ou phase de traitement : Traitement des déchets primaires de la filière incinération, nous définirons les Opérations Unitaires suivantes : alimentation du four, combustion des déchets, extraction des mâchefers. Le plus souvent ces sous-systèmes sont des dispositifs mettant en œuvre des opérations identifiables dans des séquences dissociées dont le regroupement constituera une Opération Unitaire cohérente.

Composants ou éléments :

A ce niveau de description nous identifierons des éléments ou composants assurant des opérations élémentaires. Ces éléments ou composants sont les plus souvent des appareils directement observables de manière "composée" ou "simple". Les opérations élémentaires d'une Opération Unitaire peuvent être définies de manière arbitraire selon les niveaux d'analyses souhaités. A cette échelle d'observation nous ne définirons pas les entités observées comme des sous-systèmes. Autrement dit nous n'observerons pas d'entités de niveau inférieur. C'est donc à ce stade que nous commencerons l'analyse détaillée du fonctionnement de la filière de gestion et de traitement et notamment la caractérisation des flux observées.

Caractéristiques simplifiées :

Notons que chacun des sous-systèmes et des composants définis ci-dessus feront l'objet d'une description simplifiée, présentant leurs principales caractéristiques structurelles et fonctionnelles dans une approche pertinente. Ces caractéristiques nous permettront à terme de mettre en œuvre des lois de corrélation entre les données liées aux caractéristiques détaillées des flux et les données liées aux caractéristiques simplifiées des systèmes ou des sous-systèmes. Ces caractéristiques simplifiées font intervenir des notions, économiques, technologiques, sociales, etc.

Notion de procédé :

Autour des définitions et développements que nous avons considérés dans ce paragraphe, il est important d'intégrer la notion de procédé. Nous considérerons cette notion à plusieurs échelles d'observation.

Nous pouvons définir des procédés à l'échelle des Opérations Unitaires en relation avec une association cohérente de composants ou d'éléments.

Nous pouvons aussi considérer des procédés à l'échelle des Unités Fonctionnelles en relation avec une association précise d'Opérations Unitaires (SS2). Nous pouvons les nommer **procédés de traitement** quelque soit les Unités Fonctionnelles observées.

Nous pouvons enfin considérer des associations particulières d'Unités Fonctionnelles ou de phases de gestion. Nous nommerons ces regroupements : **procédés de gestion**.

La combinaison de ces procédés constituera les scénarios de gestion et de traitement des déchets. Il conviendra de les identifier dans le chapitre ultérieur, afin de conduire nos analyses autour de ces notions.

Notons que nous avons défini ici tous les procédés de gestion et de traitement autour d'entités physiques concrètes, préalable à toute approche en analyse systémique.

Définition grandeurs physiques de description :

Nous considérons ici les grandeurs physiques intervenant dans la description d'un système. Nous aurons à décrire les propriétés de toutes des entités associées aux systèmes observés (flux de matières et d'énergie, composants, sous systèmes et système global d'observation).

Les premiers de ces grandeurs décrivent les caractéristiques de chaque entité concernant sa configuration, ses principales caractéristiques, par exemple chimiques, thermiques, biologiques, biochimiques, environnementales, mécaniques, électriques, etc. Il ne s'agit pas de dresser une liste exhaustive de grandeur physique, mais les plus pertinentes en relation notamment avec les phénomènes en jeu au niveau du système observé. Nous les dénommerons **paramètres structurels**. N'ayant pas à développer des analyses en génie des procédés et en génie des systèmes autour d'approches phénoménologiques ou technologiques autour d'équations mathématiques, ces paramètres, dans notre étude, interviennent essentiellement au niveau de la description simplifiée des systèmes et très peu dans la description des flux. Comme nous l'avons souligné précédemment, ils nous permettront de mettre en œuvre ultérieurement des lois de corrélation au niveau du fonctionnement du système afin notamment d'établir des ratios au niveau de certain des résultats.

Un deuxième type de grandeur physique intervient dans nos descriptions pour l'état du système observé autour des analyses que nous avons à conduire. Nous les dénommerons : **Paramètres fonctionnels**. Ces grandeurs préciseront un certain nombre d'information autour du fonctionnement du système. Ces paramètres différeront également dans notre étude des paramètres rencontrés en Génie des procédés ou des systèmes. Ils nous informeront sur des notions de quantités de matière ou d'énergie en jeu, sur des notions de coût, sur des notions d'impacts environnementaux, etc.

Ces paramètres interviennent à priori dans des équations de **bilan** matière et d'énergie et dans des équations de description **de phénomènes**. Ces équations se déclinant éventuellement autour de relations, de fonctions, de représentations graphiques reliant paramètres de descriptions structurelles et fonctionnelles des systèmes observés. Nous les considérerons dans notre étude à postériori pour établir des lois de corrélations autour l'analyse des systèmes de gestion et de traitement de déchets.

Organisation du système d'observation :

Chaque filière de traitement des déchets sera donc décomposée en Unités Fonctionnelles, elles même décomposées en Opérations Unitaires comprenant un

plusieurs composant autour notamment d'objectifs de transport, de transformation, ou de stockage. Les interactions avec l'environnement sont notamment décrites.

Une fois toutes ces informations collectées, elles sont compilées dans le but de déterminer la structure du système étudié, à savoir comment s'organise les sous-systèmes entre eux (notion de relation) pour la modélisation. La modélisation qui s'appuie sur des modèles mathématiques et/ou phénoménologiques (lois physiques) des phénomènes en jeu et de leurs associations. Ces lois physiques ou modèles mathématiques expliciteront le plus souvent des équations de bilan de flux matières, d'énergies ou d'informations. Ils peuvent aussi traduire des comportements ou des caractéristiques des flux ou des systèmes décrits.

II.2 Description générale de l'outil de simulation

La gestion des déchets comporte donc plusieurs niveaux d'opération et d'analyse. Il est de ce fait primordial d'organiser nos pensées et notre regard sur ce système complexe. Afin de comprendre au mieux la gestion des déchets, nous nous proposons de nous référer au cadre de l'approche systémique à partir de laquelle, nous allons pouvoir décortiquer le système d'observation en plusieurs entités physiques. Ces entités vont être disséquées en « éléments » de plus en plus simple jusqu'à atteindre un niveau d'analyse élémentaire via des modèles simples.

La conception de l'outil repose donc sur la description du système d'observation qu'est la gestion des déchets. Ce système a été analysé à différents **niveaux d'observation** allant du plus global au plus élémentaire en relation avec les phases de gestion ou les unités fonctionnelles, les Opérations Unitaires et les composants.

II.3 Le choix du modèle : Description des sous-niveaux

La conception de l'outil passe par, nous l'avons vu, une description poussée de chacun des niveaux d'observation. Dans l'outil, cette description des niveaux d'observation passe par la mise en place d'une navigation verticale à l'aide d'un menu. La navigation verticale considérée permet de visualiser le niveau dans lequel se situe l'utilisateur tout en visualisant les niveaux supérieurs déjà visités. Cette navigation se fait, d'abord dans le sens descendant, puis dans le sens montant. Au cours de la navigation descendante chaque niveau de description ou échelle d'observation est décrite dans une approche qualitative ou est représenté l'ensemble des sous-systèmes ainsi que leurs articulations et interactions à tous les niveaux. Il s'agit donc de matérialiser les entités intervenant au cours des différentes opérations qui sont menées autour de la gestion et du traitement des déchets.

Ces opérations se font de manière organisée dans un processus hiérarchisé selon les procédés considérés. Ces entités ou sous-systèmes à différents niveaux d'observation sont traversées par des flux de matière et d'énergie variables selon les phases des opérations. Il s'agira donc de les identifier également.

Ces flux dans cette phase descendante de description correspondent aux entrées et sorties physiques de chaque sous-système observé. Comme nous l'avons précisé plus haut nous compléterons cette identification des entités physiques par une acquisition de données simplifiées autour essentiellement de données structurelles (compositions des flux, capacités des unités de traitement, nombre d'opérateurs, ...)

mais aussi fonctionnelles (débits des matières convectées dans les systèmes, planning de fonctionnement, ...).

Afin de décrire et modéliser ce système, nous procédons en 2 étapes,

1) l'étape d'identification

Cette étape décrira notamment dans une approche spatiale l'ensemble des sous-systèmes composant les systèmes observés. Elle décrira également l'ensemble des matières et des énergies convectées. Elle précisera en outre les procédés en jeu dans la filière de traitement. Elle se basera sur un processus de navigation qui décrira les aspects organisationnels et notamment hiérarchique au niveau du système observé. Au cours de cette étape d'identification nous présenterons des paramètres simplifiés de description des systèmes des flux.

2) l'étape de caractérisation.

Cette étape concerne essentiellement les flux en jeu au niveau des systèmes observés. Elle se met en œuvre au niveau des composants dans le cadre d'une acquisition de données et de calcul à cette échelle d'observation. Nous remonterons ensuite graduellement à chaque sous système de la filière de traitement pour intégrer les données à différentes échelles d'observation à partir de calculs de bilans éventuellement pondérés.

L'étape de caractérisation s'appuiera donc sur des pages d'acquisitions de données autour de chaque composants. Plusieurs types d'observation seront conduits concernant les pages d'acquisition de données qui se structurent autour de chaque type d'observation. Des grandeurs récapitulatives seront calculées à cette échelle d'observation. Des pages de calcul seront ensuite développées pour retrouver les bilans souhaités. Elles se compléteront par des pages explicitant les représentations graphiques adéquats à ces résultats.

Notons que le niveau d'analyse élémentaire est défini selon les spécificités d'analyse ultérieure désirée et dépend donc entièrement de l'observateur et du degré de pertinence désiré par rapport au but recherché. Nous avons donc ici considéré le composant comme étant le niveau d'analyse le plus élémentaire.

Les étapes d'identification et de caractérisation constituent donc le cœur de la démarche développée et seront décrites pour chacun des niveaux d'observation (Figure 33).

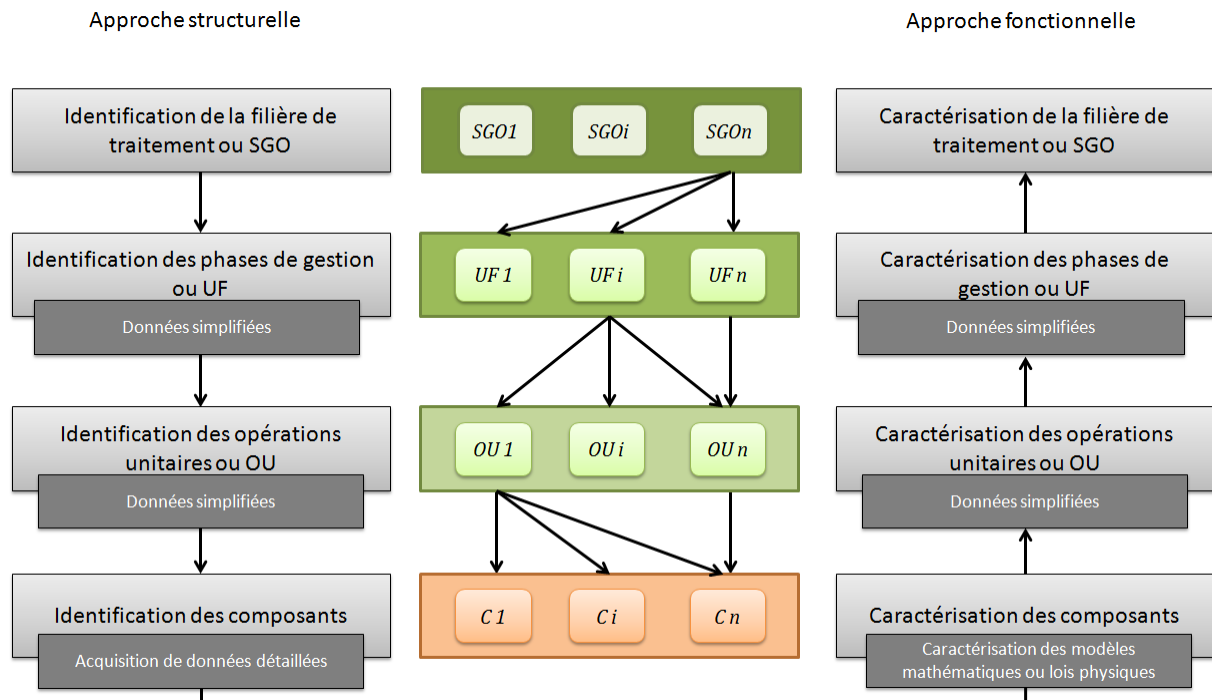


Figure 43 : Les étapes d'identification et de caractérisation des différents niveaux d'observation (source : HATIK, 2015)

Dans la phase ultime de la navigation descendante, nous nous intéressons aux composants des Opérations Unitaires. Il s'agit de les identifier comme suivant les mêmes modalités exposées pour les sous-systèmes. Mais nous devons commencer à ce stade l'étape de caractérisation. La première phase de cette étape consiste à identifier de manière détaillée les paramètres structurels tels que les capacités de traitement des composants, puissance des composants, facteurs d'émission carbone et autres indicateurs d'impact et les paramètres fonctionnels tels que les énergies consommées, les flux de produits induits, les émissions de carbone.

C'est à ce stade que débute véritablement la phase de caractérisation en relation avec une approche quantitative. Elle permet l'évaluation de certains indicateurs de fonctionnement du système de gestion et de traitement des déchets au niveau global et au niveau de chaque sous-système la composant.

Les paramètres de description que nous avons identifié font l'objet d'une acquisition de données adaptées aux situations de simulation possibles (données statistiques, données de simulations, données expérimentales, etc ...).

Cette acquisition de donnée se poursuit par des calculs adéquats à l'échelle des composants et de chaque sous-système suivant des modalités que nous avons défini plus haut. Nous remontons la navigation jusqu'au système global de traitement, afin de balayer l'ensemble des échelles d'observation. Les informations ainsi transmises d'un niveau d'observation à un autre, d'un sous-système à un autres peuvent être considérées comme des entrées et sorties mathématiques d'un système d'équation virtuelles décrivant chaque entité observée.

Cette représentation permet une navigation la plus intuitive possible aussi bien dans la phase descendante à l'étape d'identification que dans la phase montante à l'étape de caractérisation. Dans la navigation montante, le niveau supérieur

comporte les données synthétiques du niveau inférieur et ainsi de suite. Le premier niveau à savoir celui du système global d'observation nous permet d'accéder à des données synthétiques de l'ensemble des phases de gestion ou unité fonctionnelles, mais aussi de l'ensemble des Opérations Unitaires. Le choix de cette méthode a été également appuyé sur la nécessité de se référer au cadre normatif de l'ACV (Figure 44).

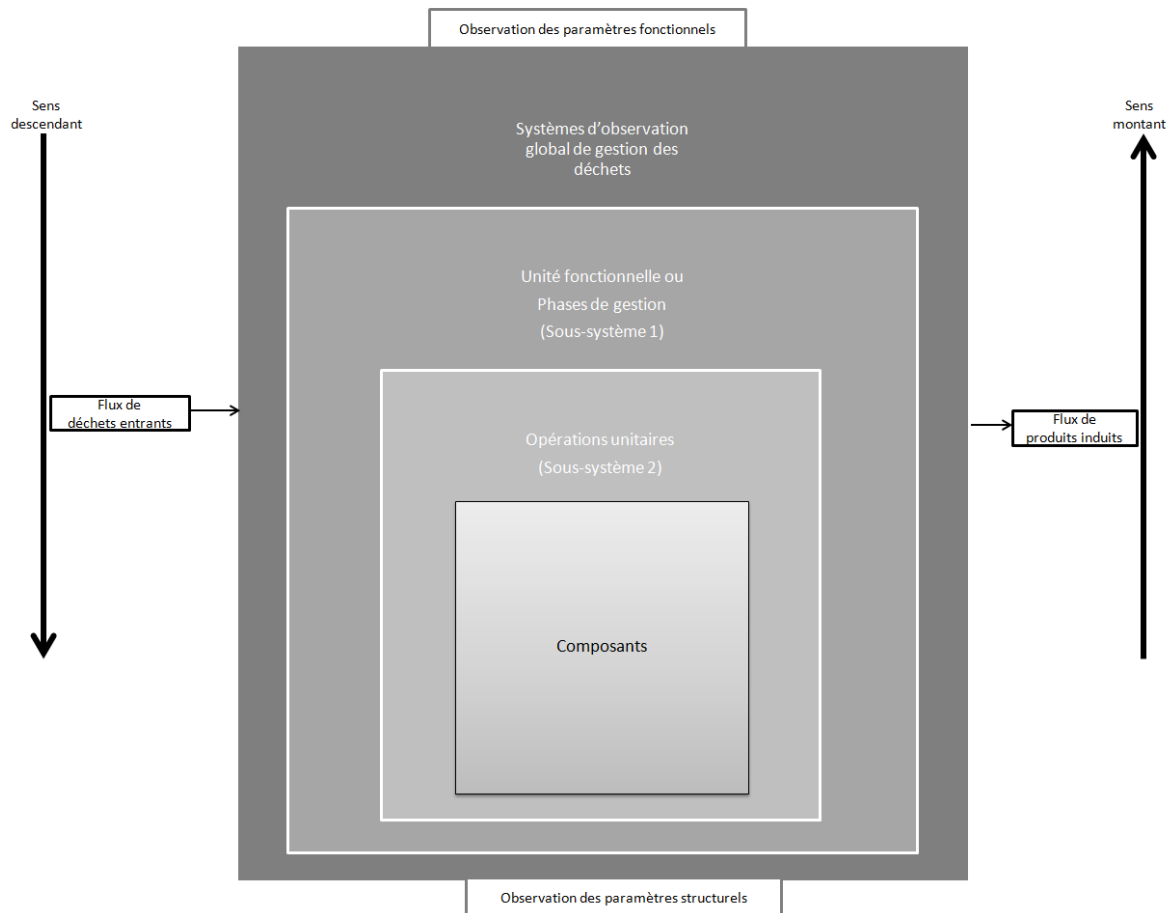


Figure 44 : Description des niveaux d'observation (source : HATIK, 2015)

La description des niveaux d'observation s'effectue donc au travers d'un menu de navigation descendante du niveau le plus global jusqu'au niveau le plus élémentaire, c'est-à-dire du système global d'observation de gestion et de traitement des déchets au composant. Le sens descendant permet l'acquisition de données tandis que le sens montant permet l'observation des résultats obtenus synthétisés pour chacun des niveaux.

Les flux entrants et sortants sont considérés, permettant ainsi la mise en relation des blocs entre eux et la mise en évidence des actions (thermiques, physiques, biologiques...) et des phases de traitement (stockage, transport et transformation). En effet, la construction d'un scénario peut se visualiser comme un jeu de lego dans lequel une association de plusieurs éléments sont nécessaires à chaque niveau pour activer le niveau supérieur et ainsi de suite. C'est à cette description de chacun des niveaux que les paragraphes suivants vont s'attacher à développer mais avant il est important de cibler les flux et paramètres observés tout au long de l'acquisition de données.

II.4 Identification des flux et de leurs paramètres de description.

Nous avons déjà présenté plus haut les paramètres de description des systèmes et sous-systèmes autour de descriptions simplifiées. Nous présentons ici plus précisément les paramètres de description détaillées autour des matières convectées et des flux d'énergie en jeu. Les matières convectées doivent être vues ici dans une approche élargie.

En premier lieu, nous avons à considérer les produits d'activités, principalement autour des déchets, des produits induits, et tous autres produits intervenant dans les transformations de matières et d'énergies opérées dans la filière de traitement.

En second lieu, nous sommes amenés à considérer les produits d'équipement en relation avec les éléments qui composent les Opérations Unitaires.

En dernier lieu, nous pouvons également être amenés à considérer les produits gros-œuvres et second-œuvre intervenant dans les infrastructures associées aux différents systèmes et sous-systèmes observés.

Ces variables caractérisent les quantités de flux de matière et d'énergie en jeu à tous les niveaux d'observation, leurs compositions éventuelles, leurs interactions avec l'environnement, leurs incidences économiques, les indicateurs spécifiques d'opérations, qu'il s'agisse d'opérations de transformation, de transport ou de stockage, et aussi tous les paramètres liés à la gestion.

Cette partie consiste donc à présenter tous ces paramètres selon trois catégories : les paramètres de gestion, les paramètres structurels et fonctionnels et enfin les flux matières et énergie.

Tableau 21 : Présentation des paramètres économiques autour des composants

Coûts d'amortissement sur la durée de vie du composant (€)		Coûts de maintenance des composants (€)		Coûts de la consommation d'énergie (€)	
Coût de l'installation du composant	Coût d'achat du composant	Coût unitaire moyen d'un entretien de maintenance	La fréquence d'entretien par an	Coût unitaire du kWh	La consommation en énergie du composant (kWh)

Tableau 22 : Présentation des paramètres environnementaux : le Bilan Carbone

Paramètres environnementaux liés aux émissions de gaz à effet de serre

FE du composant	Bilan carbone du composant	FE du flux	Bilan carbone du flux	FE de l'énergie utilisée	Bilan carbone de l'énergie utilisée

Tableau 23 : Présentation des paramètres environnementaux liés aux opérateurs

Paramètres environnementaux liés aux opérateurs

Nombre d'opérateurs présents au sein de l'UF	La marque du véhicule personnel	Type de moteur du véhicule personnel (essence ou diesel)	La distance domicile lieu de travail (km/jrs)	Type de transport pour les missions	La distance parcourue pour les missions (km/an)	FE du véhicule personnel	FE du moyen de transport de missions	Bilan carbone de l'opérateur

Tableau 24 : Présentation des paramètres économiques liés aux opérateurs

Paramètres économiques liés aux opérateurs

Type de poste (administratif, ingénieur et techniciens)	Nombre d'heures ouvrées (hrs/jrs)	Coût horaire d'un opérateur (€/hrs)

II.4.1 **Les paramètres de gestion**

Nous classons dans les paramètres de gestion tous les paramètres à caractères **économiques, environnementaux et ceux liés aux opérateurs**.

Les paramètres économiques spécifient les coûts d'investissement traduits en amortissement sur la durée de vie de l'installation, les coûts de maintenance dus à l'usure du système et les coûts de fonctionnement. En plus de ces données, nous intégrons les recettes énergétiques (vente de biogaz), et les recettes matières (vente de résidus de traitement et recyclables) (

Tableau 21).

Les paramètres environnementaux apprécient l'évaluation des émissions atmosphériques autour de la mise en évidence du bilan carbone des procédés, des Opérations Unitaires et des composants mais également aux niveaux des flux entrants et sortants matières et énergies (Tableau 22).

Et enfin les paramètres liés aux opérateurs qui sont de deux types, à savoir économiques et environnementaux. Ici, nous avons souhaité mettre en exergue l'impact environnemental du personnel pour se rendre sur leur lieu de travail ou tous autres déplacements liés à leur profession (missions) ainsi que les coûts qu'ils engendrent au sein des procédés (

Tableau 23 et Tableau 24).

II.4.2 **Les paramètres de procédés**

Ces paramètres nous permettent de cerner des données technologiques autour des opérations mises en œuvre et plus globalement des procédés de transformation explorés. Ils concernent plus précisément les **paramètres structurels et fonctionnels** qui sont identifiés au niveau des composants.

Les paramètres structurels examinent les données liées au dimensionnement du composant comme la capacité de traitement ou de stockage qui fait appel à la connaissance de la forme géométrique du contenant, la puissance installée et le rendement, etc.

Tandis que les paramètres fonctionnels correspondent aux données liées au fonctionnement propre de l'unité et par conséquent liés au flux autour notamment des débits matières (déchets et produits induits) et énergétiques (vapeur et biogaz) ou encore de fonctionnement (températures, pressions...).

D'autres paramètres complémentaires sont pris en compte comme les quantités et les caractéristiques physiques des flux (composition et PCI) ou encore l'emprise au sol des procédés afin de mettre leur dimensionnement.

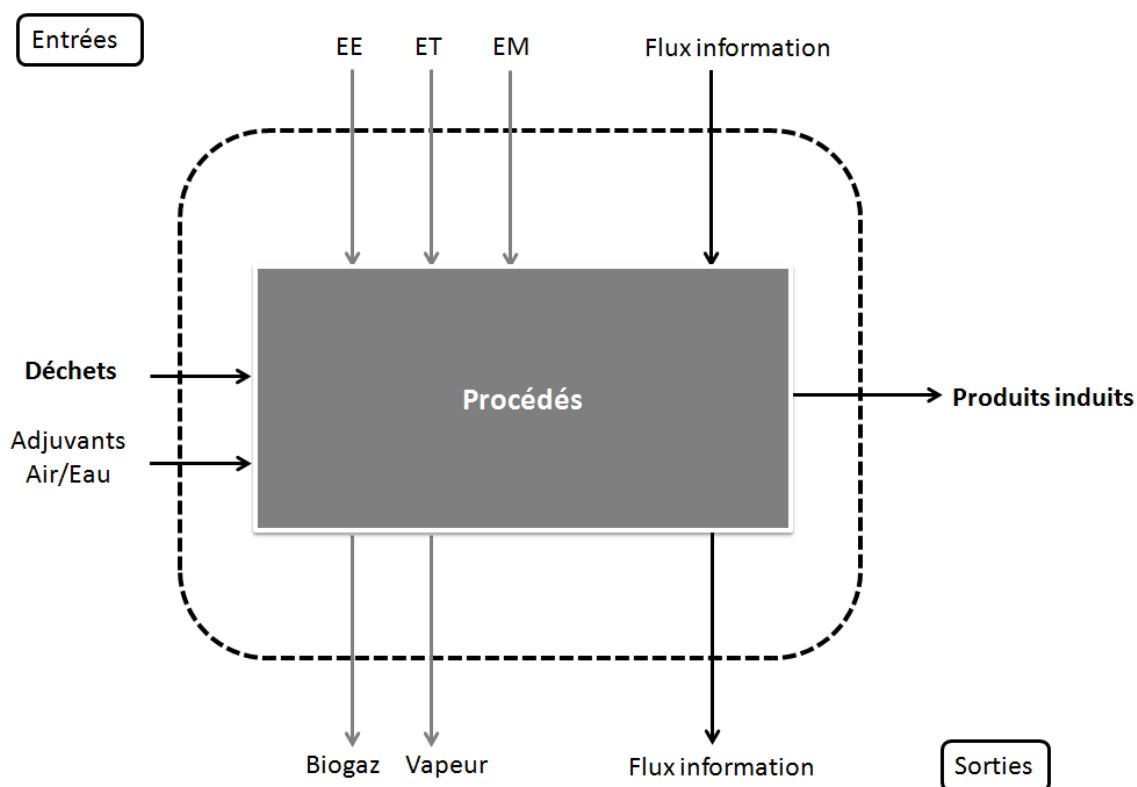


Figure 45 : Description des flux étudiés (source : HATIK, 2015)

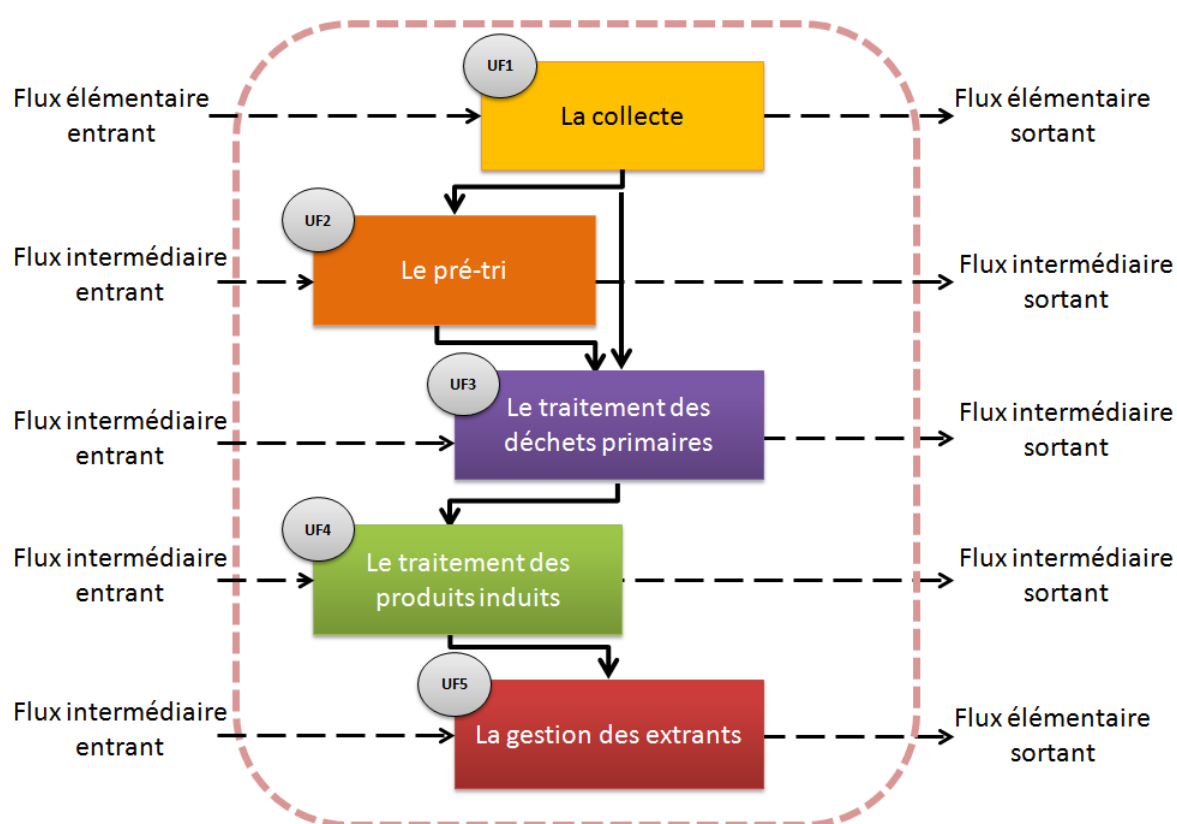


Figure 46 : Description générale du système global d'observation de gestion des déchets (source : HATIK, 2015)

II.4.3 Les paramètres d'identification des flux matières et énergies

En plus des paramètres précédant, des paramètres d'identification des **flux matières et énergies** au sein des procédés, des Opérations Unitaires et des composants sont observés.

Les flux matières représentent les différentes classes de déchets non dangereux, dangereux et inertes (Cf. chapitre I) ainsi que tous les produits induits de traitement comme le digestat, le compost ou encore les cendres et mâchefers, qui constituent respectivement les flux matières entrants et sortants.

Les flux énergies correspondent aux types fondamentaux d'énergie comme l'énergie électrique (EE), mécanique (EM), thermique (ET) souvent sous forme de vapeur, de chaleur, de gaz ou encore d'électricité (Figure 45).

II.5 Description du système global d'observation



Le système d'observation global comme définit plus haut correspond à l'ensemble des systèmes en relation avec un objectif de traitement global d'un type de déchets, ce que nous traduisons par un scénario de gestion des déchets. En effet, notre objectif est de mettre en place un outil de simulation qui nous permette:

- 1) une identification et une caractérisation des scénarii de gestion,
- 2) l'évaluation des scénarii en termes d'impact afin de faciliter la prise de décision.

Au regard de cet objectif, nous avons déterminé un certain nombre de paramètres pour chacun des niveaux d'observation.

Nous avons vu que le système d'observation global se décompose en un ensemble d'Unités Fonctionnelles en relation avec les différentes phases de gestion. Nous avons vu également que le système d'observation global se définit comme une filière de traitement dans laquelle sont déterminés un ou plusieurs modes de traitement. Ce sont ces modes de traitement qui vont déterminer toute la chaîne de gestion au travers des phases de gestion.

Ces phases de gestion constituent les étapes clé de cheminement d'un déchet de son traitement à son élimination. Nous avons défini la gestion des déchets en 5 étapes : la collecte, le pré-tri, le traitement des déchets primaires, le traitement de produits induits et la gestion des extrants. Pour chacune de ces phases sont décrits les niveaux d'observation inférieurs (les Opérations Unitaires et les composants) (Figure 46).

Autrement dit, dans l'observation du système, nous nous sommes aperçus que la chaîne de gestion était conditionnée premièrement par les objectifs de traitement (type de déchets) et deuxièmement par le mode de traitement.

De ce fait, il était important de considérer le ou les modes de traitement du scénario avant de considérer les phases de gestion.

Dans la conception de l'outil, et par conséquent, dans la mise en œuvre du menu de navigation, nous avons intégré une étape préalable aux phases de gestion à savoir le choix des modes de traitement. Cette prise en considération, nous permet d'introduire le fait que les scénarios de gestion peuvent être considérés comme des filières de traitement basées sur un ou plusieurs modes de traitement.

Il semble important à ce stade de définir la frontière du système global. Popovici a défini deux types de frontières : une frontière physique qui inclue tous les éléments physiques du système comme les infrastructures et une frontière des flux qui, elle, considère les procédés présents dans le système. Notre étude entre clairement dans les deux approches : frontières des systèmes et des flux. Nous articulons nos descriptions autour des types de déchets introduisant ainsi les flux en jeu et des modes de traitement introduisant les systèmes à observer.

C'est donc sur l'analyse des flux entrants et sortants des phases que nous allons découvrir l'ensemble du système d'étude. Cette approche sera décrite par une page d'accueil de la phase où un schéma systémique des flux sera mis en valeur afin de visualiser très précisément les inputs et outputs du niveau observé ainsi que la structure d'étude. Chaque niveau d'observation devra donc comporter un schéma systémique présentant l'organisation du niveau inférieur ainsi que les flux présents. A cela, il sera également nécessaire d'insérer un tableau synthétique résumant les données du niveau inférieur dans le cas d'une navigation montante. Cette structure permet de visualiser à tous niveaux la structure des niveaux inférieurs (et donc à venir) et de visualiser les acquisitions des données considérées pour cette étape de synthèse.

La structure du système s'analyse donc au travers des différentes phases de gestion à l'intérieur desquelles l'identification des Opérations Unitaires et des composants sont effectuées. L'assemblage de ces sous-niveaux constituera à terme une filière de traitement qui est en réalité un scénario de gestion. Nous introduisons synthétiquement ces différentes phases dans les paragraphes suivants. Afin de faciliter la lecture, nous avons choisi d'illustrer ces différentes phases autour de l'exemple de l'incinération.

Dans ce cas, le scénario de gestion est par conséquent une filière de traitement des déchets par incinération. Ici, la filière se compose d'un mode de traitement qu'est l'incinération. Un autre scénario de gestion aurait pu être défini en considérant l'incinération et l'enfouissement combinant ainsi deux modes de traitement. Nous pouvons d'ores et déjà avoir un aperçu de la diversité des scénarios de gestion possibles et de filières différentes pouvant être construites. Comme précisé au paragraphe précédent, la description du système commence par l'analyse des flux. Ici, nous avons choisi de traiter des déchets ménagers et ainsi d'observer leur

évolution au cours de leur cheminement au travers de la chaîne de la gestion en passant par des phases de stockage, de transport et de transformation.

Il est important d'ajouter que notre système global d'observation commence au moment où le flux est collecté. Ici, s'agissant des déchets ménagers et assimilés, la collecte s'effectue par des prestataires de services en porte-à-porte. Le système d'observation s'arrête au moment où les déchets primaires ont été traités et les produits induits gérés.

En résumé, nous considérons un scénario de gestion des déchets ménagers par incinération selon des objectifs d'élimination au travers de différentes phases de gestion constituant la chaîne de gestion.

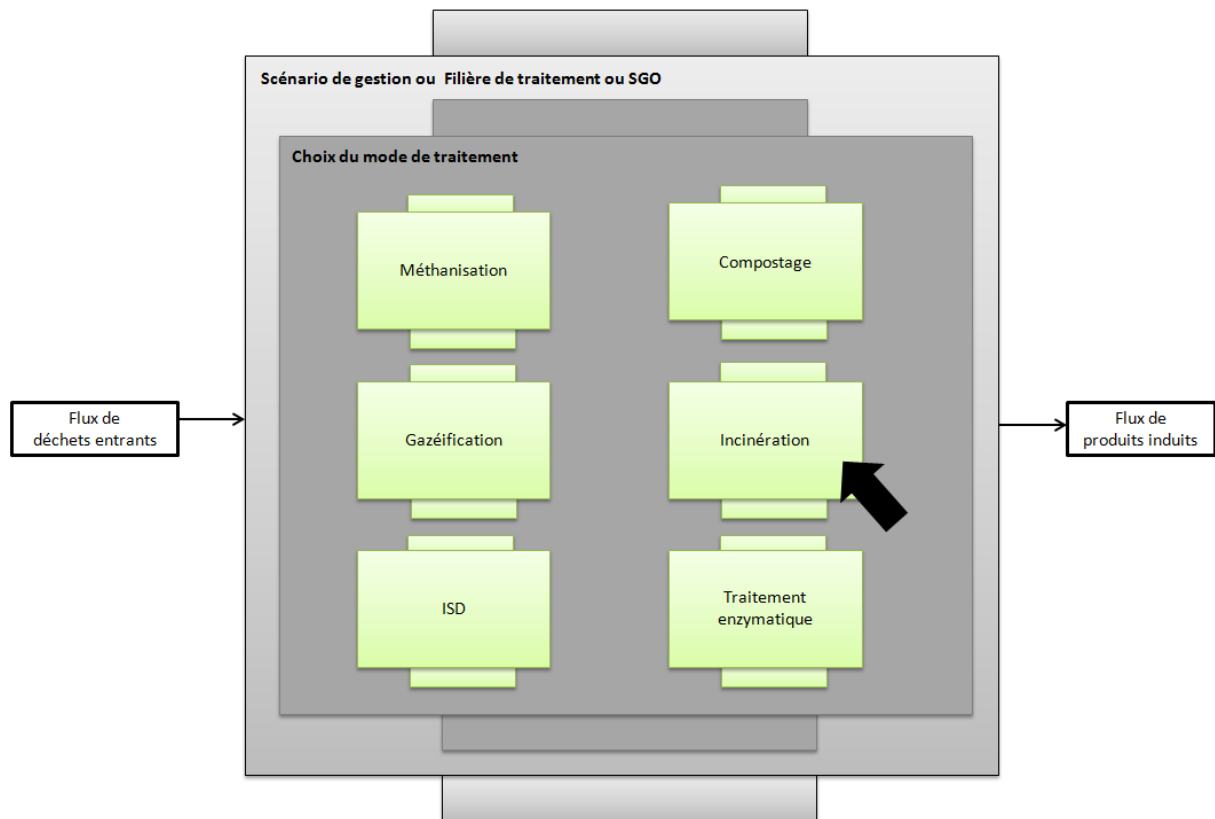


Figure 47 : Navigation au sein de l'outil : le choix du mode de traitement (source : HATIK, 2015)

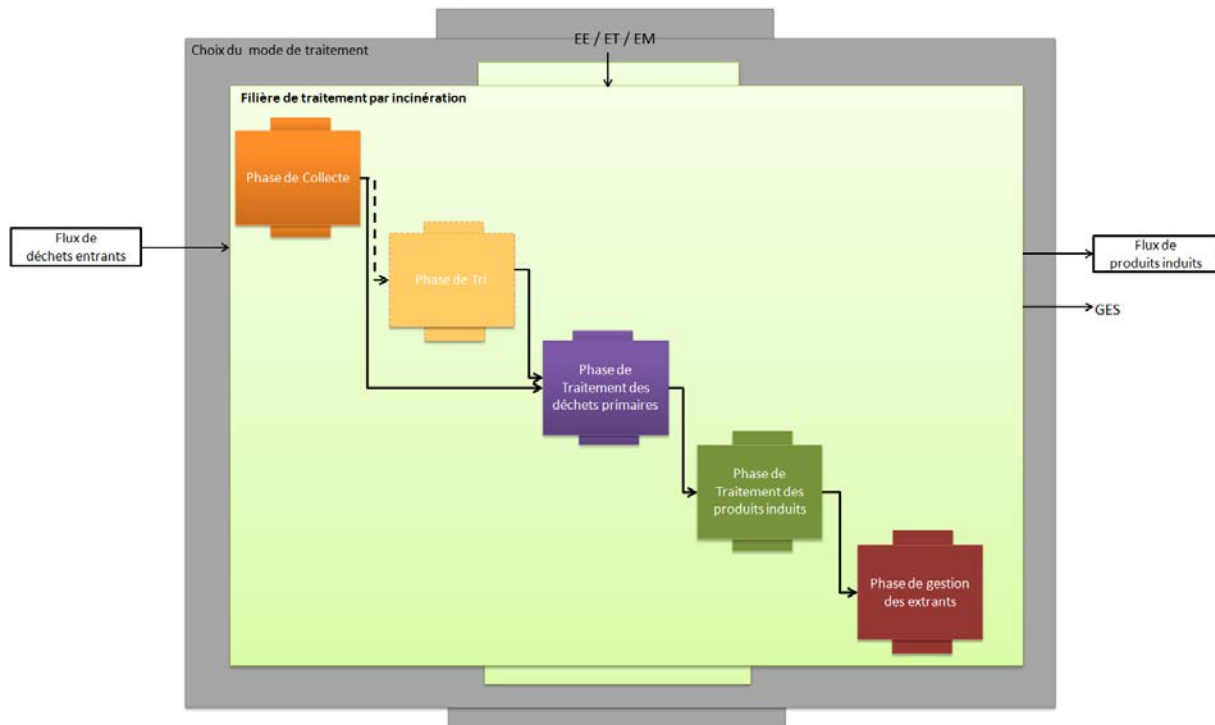


Figure 48 : Présentation du Système Global d'Observation (source : HATIK, 2015)

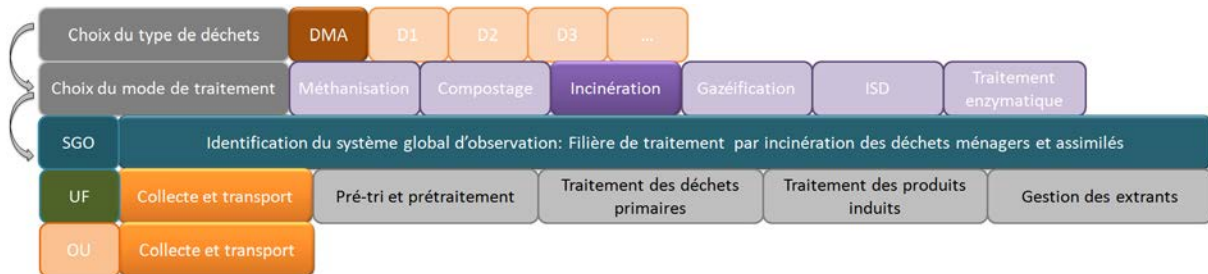
II.6 Description des Unités fonctionnelles, des Opérations Unitaires et des composants



Comme présenté plus haut, la navigation au sein de l'outil s'effectue tout d'abord par la sélection des déchets à traiter, ici les DMA et du ou des modes de traitements, ici l'incinération. Toute cette partie s'attache donc à décrire la navigation conceptuelle de l'outil au travers de schémas systémiques appliqués à l'exemple traité.

Pour cela, un menu de navigation est présenté en début de chaque Unité Fonctionnelle et de chaque Opération Unitaire afin de visualiser le chemin parcouru. La Figure 47 et la Figure 48 présentent respectivement le choix du mode de traitement et des Unités Fonctionnelles du mode de traitement. Il s'agit là de schématiser le processus d'entrée dans le SGO d'incinération des DMA en cliquant sur le mode de traitement pour découvrir les niveaux d'observation inférieurs à savoir les Unités Fonctionnelles le composant.

II.6.1 Unités Fonctionnelles de Collecte et transport



La collecte correspond au transport des déchets d'un point A à un point B qui bien sûr diffère selon le type de déchet. De manière générale, cette collecte s'effectue à la source de production pour le point A et à la fosse de stockage alimentant l'unité de traitement (le procédé de traitement) pour le point B. La collecte ne présente pas de mode de collecte qui lui est propre, ce dernier étant conditionné en fonction du procédé de traitement et de la nature du déchet. Par ailleurs, elle se compose d'une Opération Unitaire de collecte et de transport. Les différents composants de l'Opération Unitaire seront donc le matériel nécessaire au transport des déchets comme par exemple les moyens de transport (véhicules).

Dans notre exemple, nous considérons les déchets ménagers. Pour ce faire, deux modes de collecte sont possibles selon l'organisation du territoire : collecte multi-matériaux à deux voies ou à trois voies. A la Réunion, c'est la collecte à deux voies qui est actuellement en place. Nous nous basons donc sur ce système.

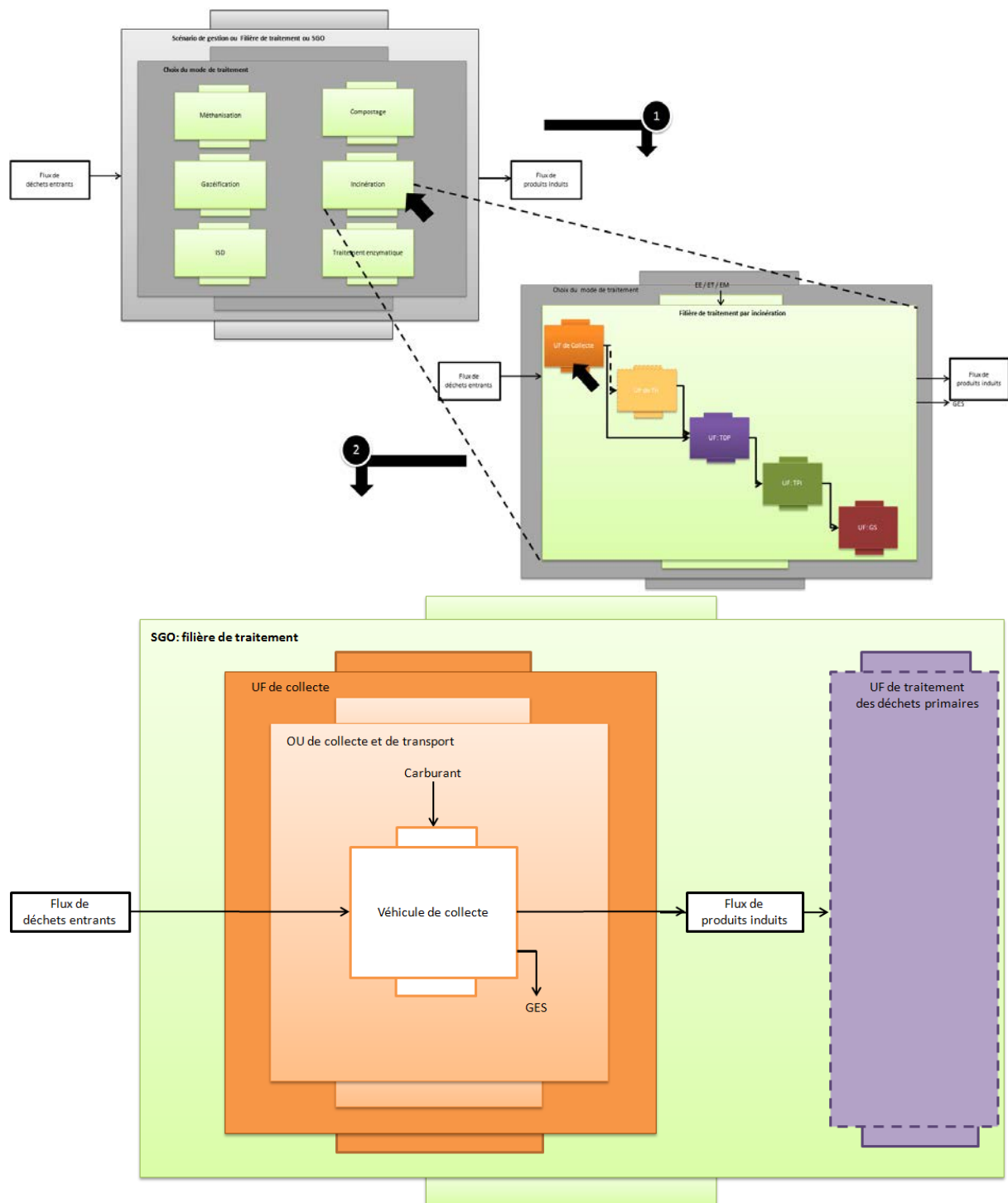


Figure 49 : L'identification de la phase de collecte et de transport
(source : HATIK, 2015)

Cela signifie que les biodéchets sont contenus dans ce flux en mélange avec les autres déchets dits ultimes pour être éliminés par incinération.

La collecte se compose donc d'une Opération Unitaire, celle de collecte et de transport. Afin de mener à bien cette étape, les composants nécessaires sont des véhicules de transports de type camions benne. L'utilisateur de l'outil doit donc pouvoir identifier ces véhicules précisément et c'est au travers de ces composants essentiels à la collecte que vont être analysés les flux.

Cette Opération Unitaire est donc observée au travers des flux collectés et transportés mais également autour des paramètres de gestion économiques et environnementaux. Les flux matières considérés sont les déchets ménagers qui ne subissent aucune transformation au cours de cette phase. Les déchets sont juste transportés d'une phase de gestion à une autre. On aura donc en entrée comme en sortie des déchets ménagers en même quantité. Lors de cette étape, il ne s'opère aucun changement sur les flux matières que ce soit sur la qualité des déchets que sur leur quantité. La collecte peut donc être vue comme une étape de transfert et de stockage temporaire (Figure 49). Cependant, si l'on observe les flux d'énergie, en entrée il y a le carburant nécessaire aux véhicules de transport et en sortie les émissions de gaz d'échappement. Il en découle que les paramètres de gestion économiques et environnementaux sont étroitement liés à ces flux d'énergie. Au cours de la conception de l'outil, il est donc fait mention de la consommation de carburant des véhicules ainsi que du prix unitaire du litre de carburant pour répondre à la problématique de coût. Mais également aux facteurs d'émissions du composant (gaz d'échappement) et des déchets transportés pour une vision précise des émissions.

En résumé, la phase de collecte des déchets sera vue comme une seule Opération Unitaire celle de collecte et de transport des déchets. Cette Opération Unitaire comporte des composants identifiés comme étant des véhicules de collecte et de transport. Autour de ces composants, les paramètres considérés sont les flux matière (les déchets) et les flux d'énergie liés à la consommation de carburant et aux émissions de gaz à effet de serre. Afin de répondre aux problématiques attachées aux paramètres économiques et environnementaux des indicateurs sont à estimer. Ces indicateurs permettent d'obtenir des informations sur le coût général de la phase de collecte autour notamment du coût en carburant mais également en entretien des véhicules et en investissement. Tous ces indicateurs peuvent être ramenés à la durée de vie du composant avec pour objectif une observation globale du système. En plus des flux et des paramètres liés à la description fonctionnelle de la phase de collecte, des paramètres structurels sont également décrits par le biais de l'analyse du composant lui-même, à savoir sa capacité de transport et le nombre de kilomètres parcourus.

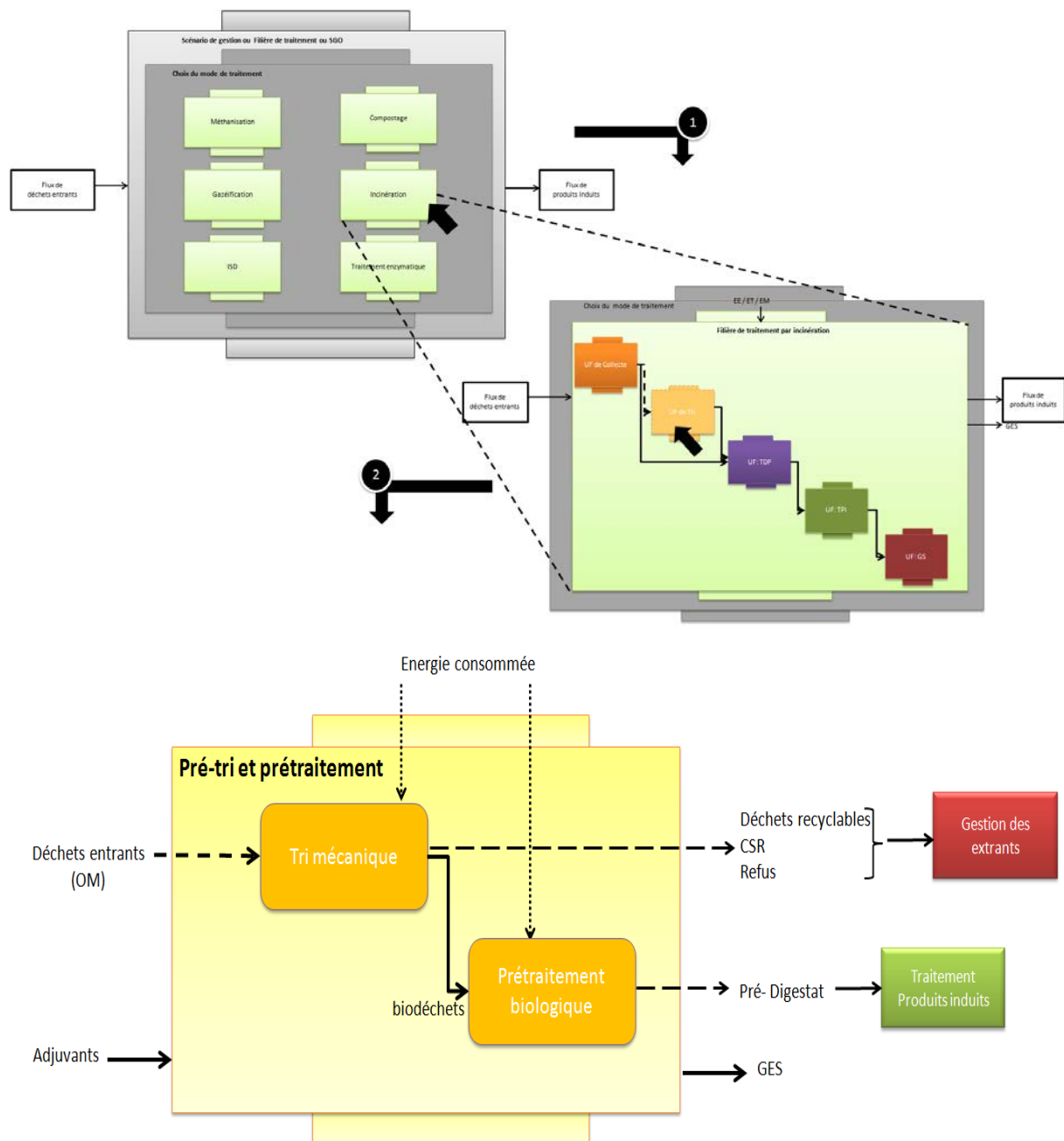


Figure 50 : Présentation de l'Unité Fonctionnelle de pré-tri et prétraitement (source : HATIK, 2015)

Il est important de préciser que ce cas est particulier à l'incinération. En effet, dans d'autre SGO, la collecte des déchets primaires peut être visualisée en plusieurs Opérations Unitaires, à savoir la collecte, le transport et le stockage ou micro-stockage.

II.6.2 **L'Unité Fonctionnelle de pré-tri et prétraitement**



Le pré-tri est une étape optionnelle de la chaîne de gestion des déchets. Cette étape dépend de la nature du déchet, à savoir si ce dernier nécessite un tri avant l'entrée en unité de traitement. Par exemple, l'objectif de l'étude est de proposer des scénarii de gestion des déchets organiques. Si les déchets organiques sont collectés avec les ordures ménagères comme tel est le cas à la Réunion, ils devront subir une étape de séparation afin d'être isolés des autres déchets non organiques. Pour cette étape de pré-tri deux types de procédés sont considérés : le prétraitement biologique qui consiste en une phase d'hygiénisation des déchets organiques et le pré-tri mécanique (Figure 50).

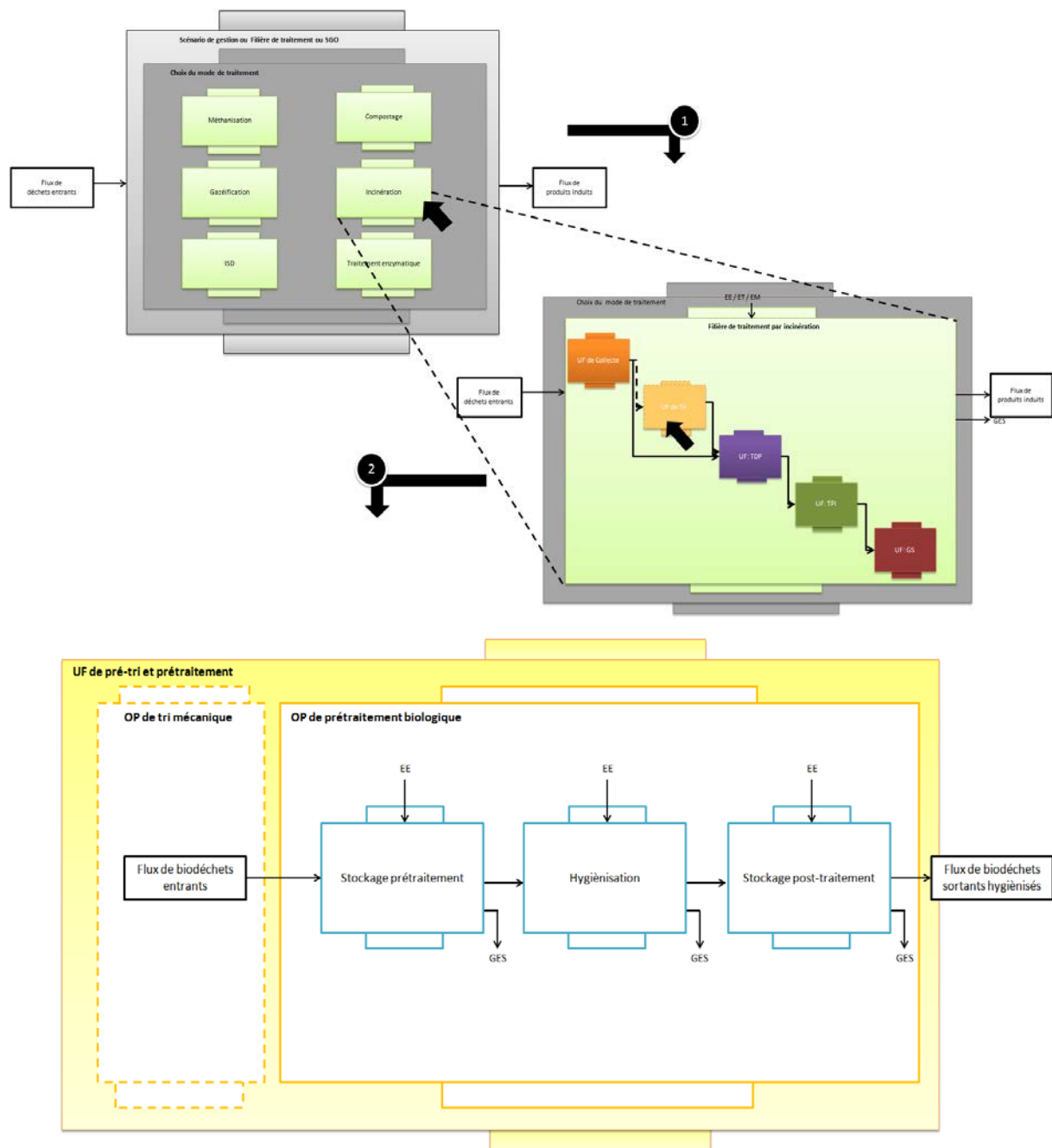


Figure 51 : Description de l'Opération Unitaire de prétraitement biologique (source : HATIK, 2015)

II.6.2.1 *L'Opération Unitaire de prétraitement biologique*



Le prétraitement biologique peut être caractérisé comme une phase de pré-fermentation souvent présente en amont des unités de méthanisation à la seule différence qu'il n'y a pas d'extraction de biogaz mais seulement un système de chauffe permettant la « pasteurisation » des flux entrants. Dans ce cas, trois composants peuvent être numérisés (Figure 51) :

- 1) stockage prétraitement des entrants,
- 2) hygiénisation,
- 3) stockage post-traitement.

Ces composants sont chacun représentés par un récipient de type cuve, fosse ou digesteur. Les flux considérés au travers de cette étape d'hygiénisation sont les déchets entrants qui ne subissent pas ou peu de transformation puisque le but ici est de nettoyer les déchets de leurs micro-organismes pathogènes et ainsi d'assainir le flux pour les traitements suivants.

Nous considérons de ce fait les déchets entrants qui comme pour la phase de collecte sont identiques en entrée et en sortie du composant. En plus des flux matières, il peut être considéré des flux énergie comme la chaleur à apporter au composant pour hygiéniser le flux matière et les émissions en sortie.

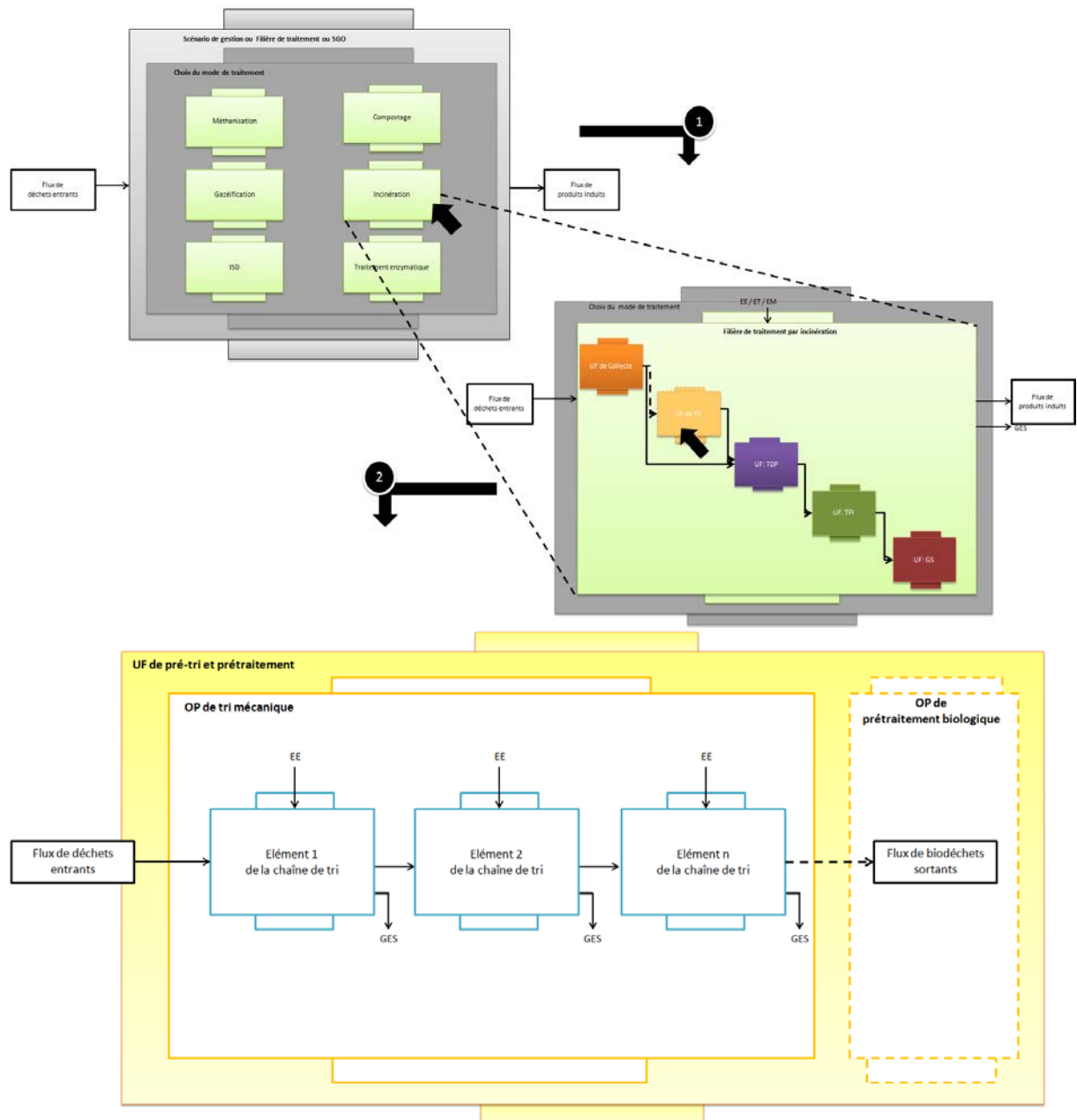
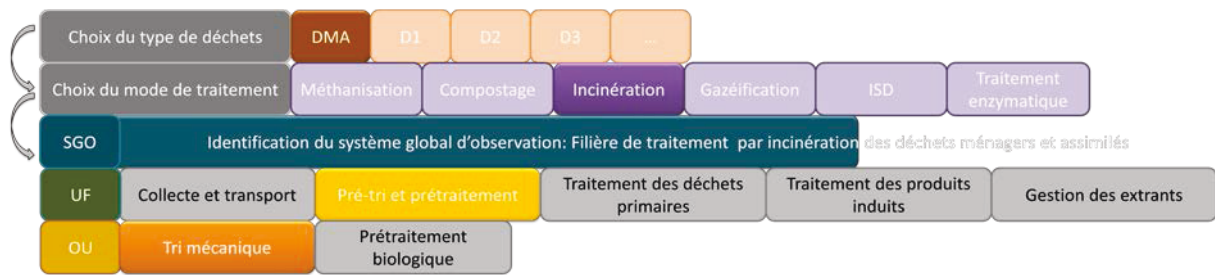


**Figure 52 : Description de l'Opération Unitaire de tri mécanique
(source : HATIK, 2015)**

II.6.2.2 *L'Opération Unitaire de Tri mécanique*



Le pré-tri ou tri mécanique est représenté comme une chaîne de composants ayant chacun un objectif de traitement spécifique. Chaque tri mécanique est unique en fonction de l'ordre d'assemblage des composants entre eux ou au contraire leur absence au sein de la chaîne. Cette chaîne est donc entièrement dépendante des objectifs de traitement et est bien sûr de l'utilisateur. Nous considérons donc l'Opération Unitaire de tri mécanique au travers d'un certain nombre de composants (Figure 52).

Comme présenté au cours du chapitre introductif, une chaîne complète de tri mécanique se compose d'over-band, de tapis vibrants ou tables « rebondissantes », de cribles et/ou de trommels, de déchiqueteuse, de tamis, bioréacteurs, de centrifugeuses, de broyeurs, de brasseurs et de presses. Il est évident qu'une chaîne de tri ne comportera jamais tous ces éléments à la fois. En effet, tous les composants de types brasseurs, presses, centrifugeuses et bioréacteurs sont plutôt destinés à des déchets de nature liquide ou semi-liquide. A l'inverse dans le cas du tri des déchets ménagers, on retrouvera des over-bands, des cribles, des trommels, de tapis ou convoyeurs, des déchiqueteuses, des tables vibrantes et même un bioréacteur dans le cas d'extraction des biodéchets.

A l'issue de ce tri mécanique, plusieurs flux sont possibles toujours en fonction des objectifs de traitement. Si l'utilisateur souhaite extraire les déchets recyclables des ordures ménagères, il devra mettre en place une over-band afin de détourner les recyclables métalliques, les cribles et les trommels permettent d'extraire des inertes comme les graviers ou encore le verre mais également les plastiques creux (bouteilles) selon les diamètres d'affinage. Il en va de même pour tous les autres composants. Nous avons pu voir que les flux matières subissaient une transformation au cours de ce tri.

En effet, le flux entrant est de forme multi-matériaux et en sortie on obtient des flux mono-matériaux. Nous pouvons donc estimer qu'il y a effectivement une transformation du flux entrant par sa subdivision en plusieurs flux distinctement séparés. Ces flux de sortie correspondant par conséquent au choix des composants de la chaîne de tri. Outre les flux matières, nous considérerons les flux énergie comme l'énergie électrique nécessaire au fonctionnement des différents composants et en sortie de la même façon que précédemment les émissions de GES.

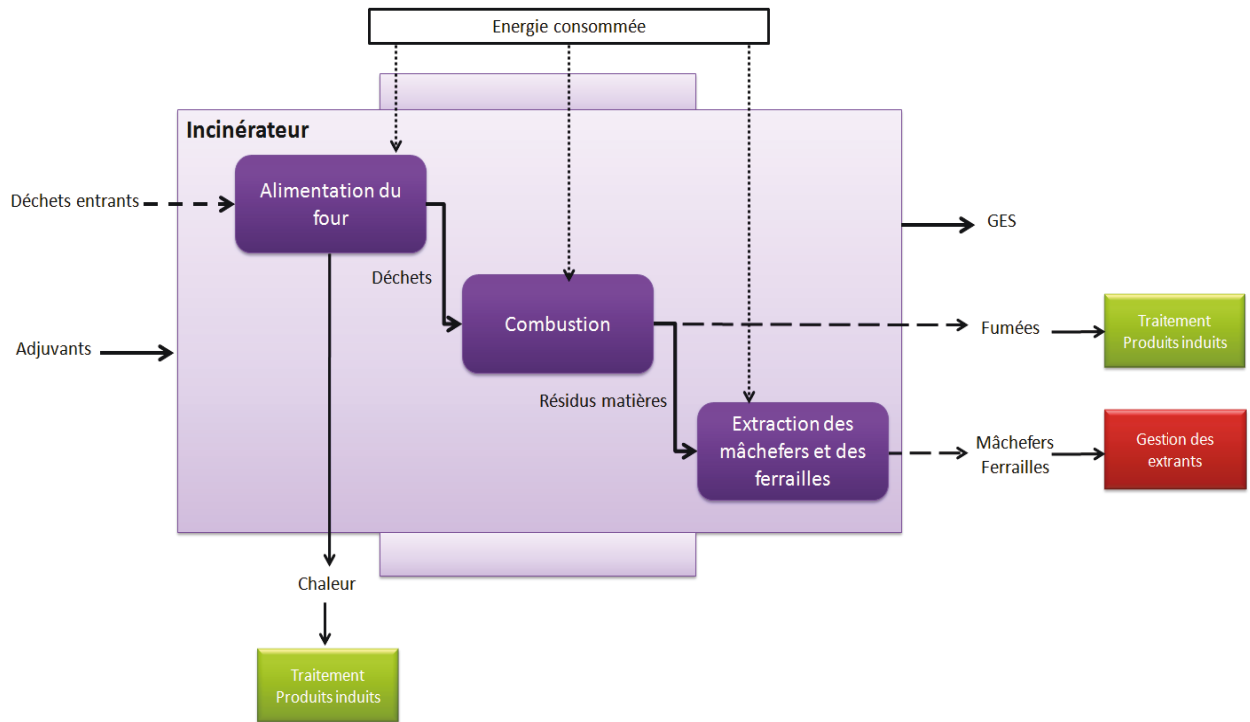


Figure 53 : Présentation de l'Unité Fonctionnelle d'incinération (source : HATIK, 2015)

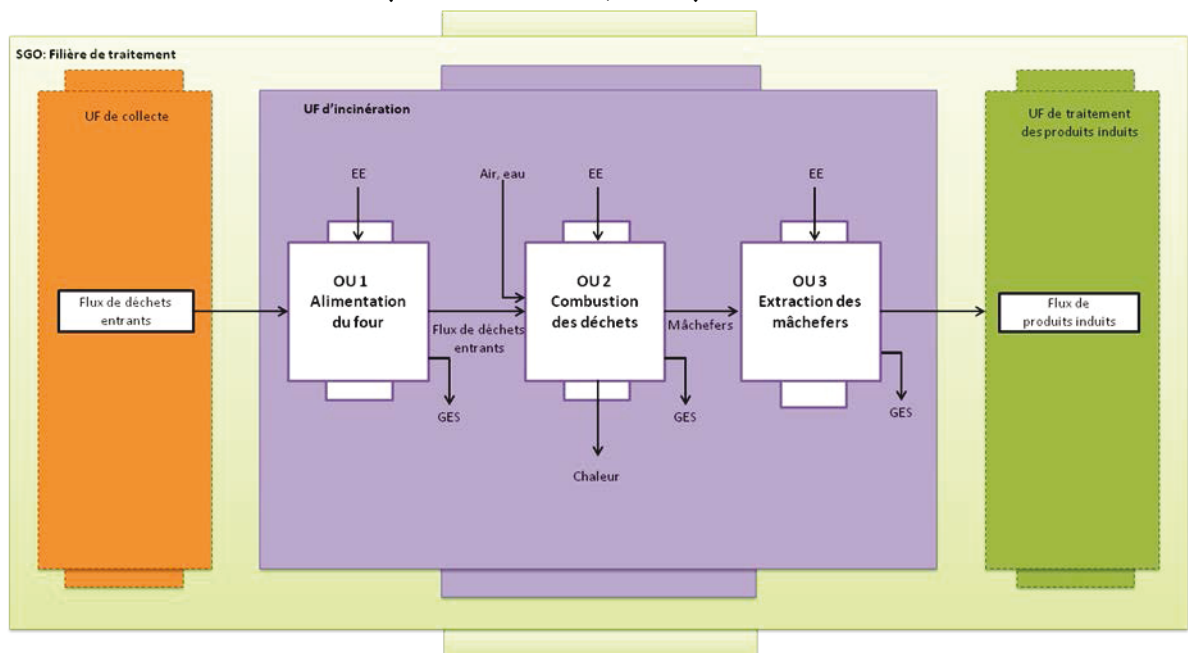
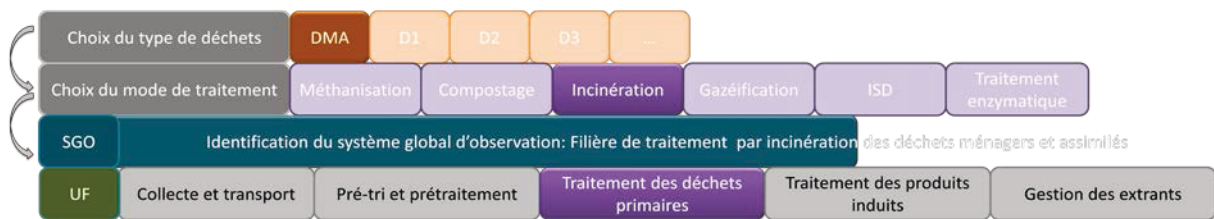


Figure 54 : Navigation au sein de l'UF d'incinération (source : HATIK, 2015)

De plus pour chaque composant est observé sa structure autour notamment de ses dimensions, des indicateurs tels que la puissance, de la taille au mètre carré (dimensionnement volumique) et du rendement.

Dans le cas de notre exemple, la phase de pré-tri n'est pas nécessaire car l'objectif de traitement est l'élimination et non la valorisation d'une partie des déchets ménagers. Il est important de préciser que si l'objectif du scénario de gestion était la valorisation matière de la FFOM contenue dans les ordures ménagères, une phase de pré-tri aurait été absolument nécessaire. Par ailleurs, pour un objectif d'extraction des biodéchets des déchets ménagers la phase de pré-tri aurait fait appel aux deux Opérations Unitaires de prétraitement biologique et de tri mécanique. En effet, une première étape de tri mécanique permettant d'extraire en mono-flux les biodéchets et dans une deuxième étape le prétraitement biologique afin « d'hygiéniser » le mono-flux avant traitement.

II.6.3 **L'Unité Fonctionnelle de traitement des déchets primaires**



Le traitement des déchets primaires représente l'ensemble des procédés de traitement couramment utilisés dans le traitement des déchets avec pour but leur transformation soit en vue d'une valorisation matière et/ou énergie, soit en vue de leur élimination. Les procédés identifiés sont au nombre de 11 : le compostage, la méthanisation, le traitement enzymatique, l'incinération, la gazéification, l'installation de stockage des déchets (non dangereux, dangereux et inertes), le centre de tri, la déchetterie et les filières de traitement spécifiques des déchets inertes, dangereux et non dangereux. Pour chacun de ces procédés, un certain nombre d'Opérations Unitaires ont été identifiés et présentés en annexe 10. En effet, les 11 procédés ne pouvant être tous décrits précisément dans le manuscrit, nous nous attachons à les présenter sous forme de schémas systémiques en annexe 11 et à illustrer les propos selon l'exemple du départ c'est-à-dire l'incinération des déchets ménagers.

De ce fait, l'incinération des déchets ménagers comprend une Unité Fonctionnelle centrale qui est l'incinérateur. Au sein de cette Unité Fonctionnelle, trois Opérations Unitaires ont été identifiées (Figure 53 et Figure 54) :

- 1) l'alimentation du four,
- 2) la combustion des déchets
- 3) l'extraction des mâchefers.

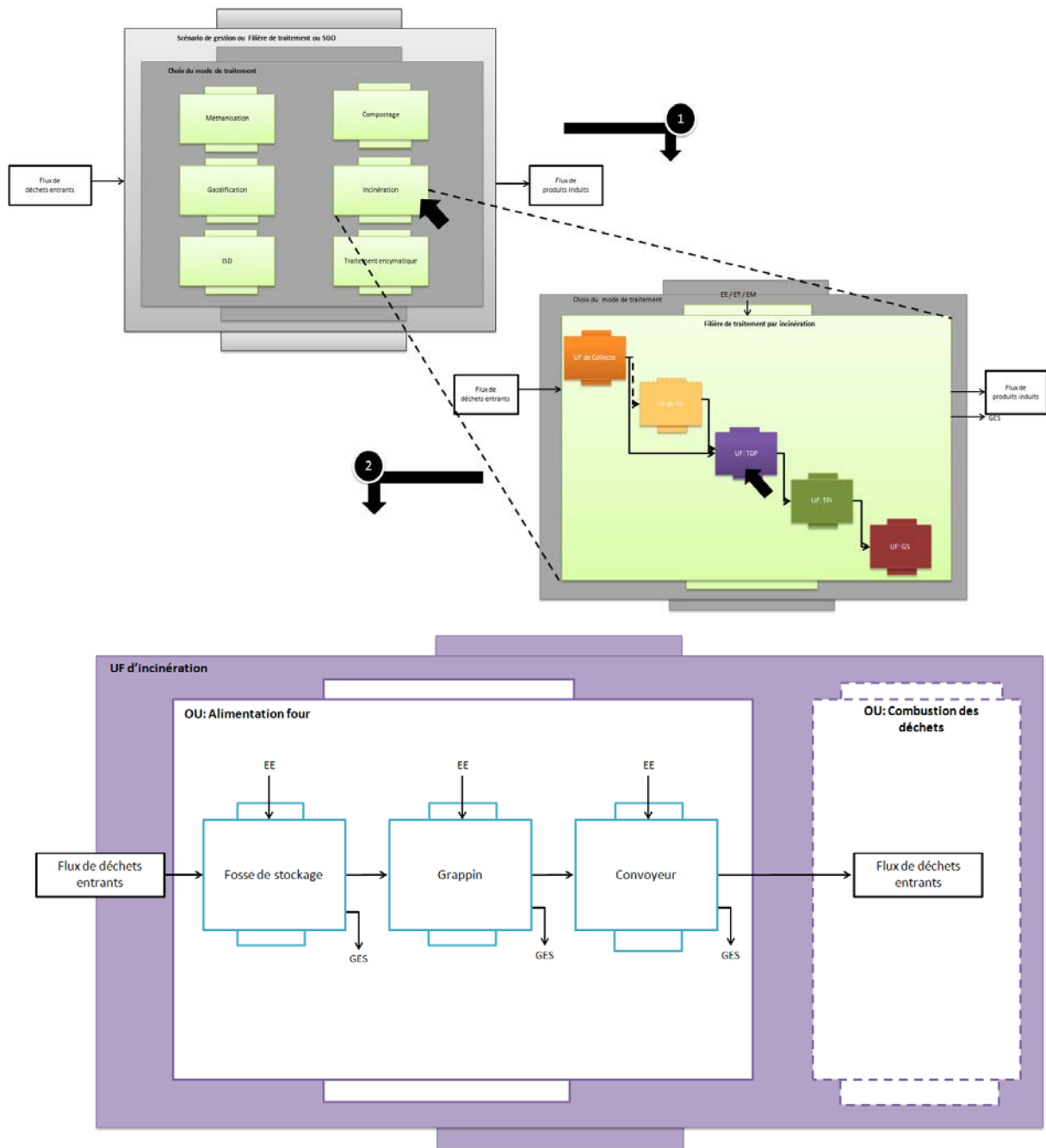
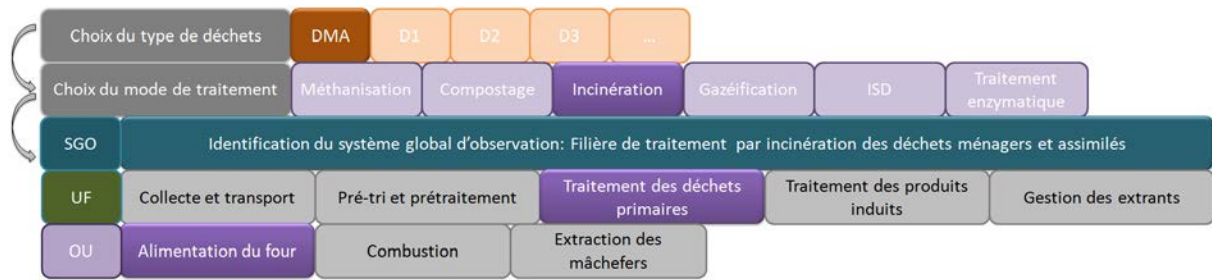


Figure 55 : Description de l'Opération Unitaire d'alimentation du four
(source : HATIK, 2015)

II.6.3.1 *L'alimentation du four*



L'alimentation représente l'étape relais à la collecte. En effet, à la suite de la collecte, les déchets sont livrés à l'unité de traitement premièrement composée d'une fosse de stockage où sont déversés les déchets. Comme toutes étapes de stockage aucune transformation n'est opérée sur les flux matière.

Puis les déchets suivent un parcours dit d'alimentation allant de la fosse de stockage au four. Pour ce faire, un grappin et un convoyeur sont nécessaires afin d'atteindre cet objectif d'alimentation. L'Opération Unitaire d'alimentation est donc composée de trois composants (Figure 55):

- 1) une fosse de stockage,
- 2) un grappin
- 3) un convoyeur.

Les flux observés sont les déchets entrants qui sont conservés dans le même état en sortie. Et les flux énergie liés aux besoins en électricité des composants en entrée et toujours les émissions en sorties. Intrinsèquement les paramètres économiques et environnementaux sont également identifiés pour chacun des composants toujours autour des facteurs d'émissions, des coûts d'entretien, d'investissement et d'énergie consommée. Les paramètres structurels sont la dimension volumique ou massique, la capacité de traitement ou de stockage et la puissance.

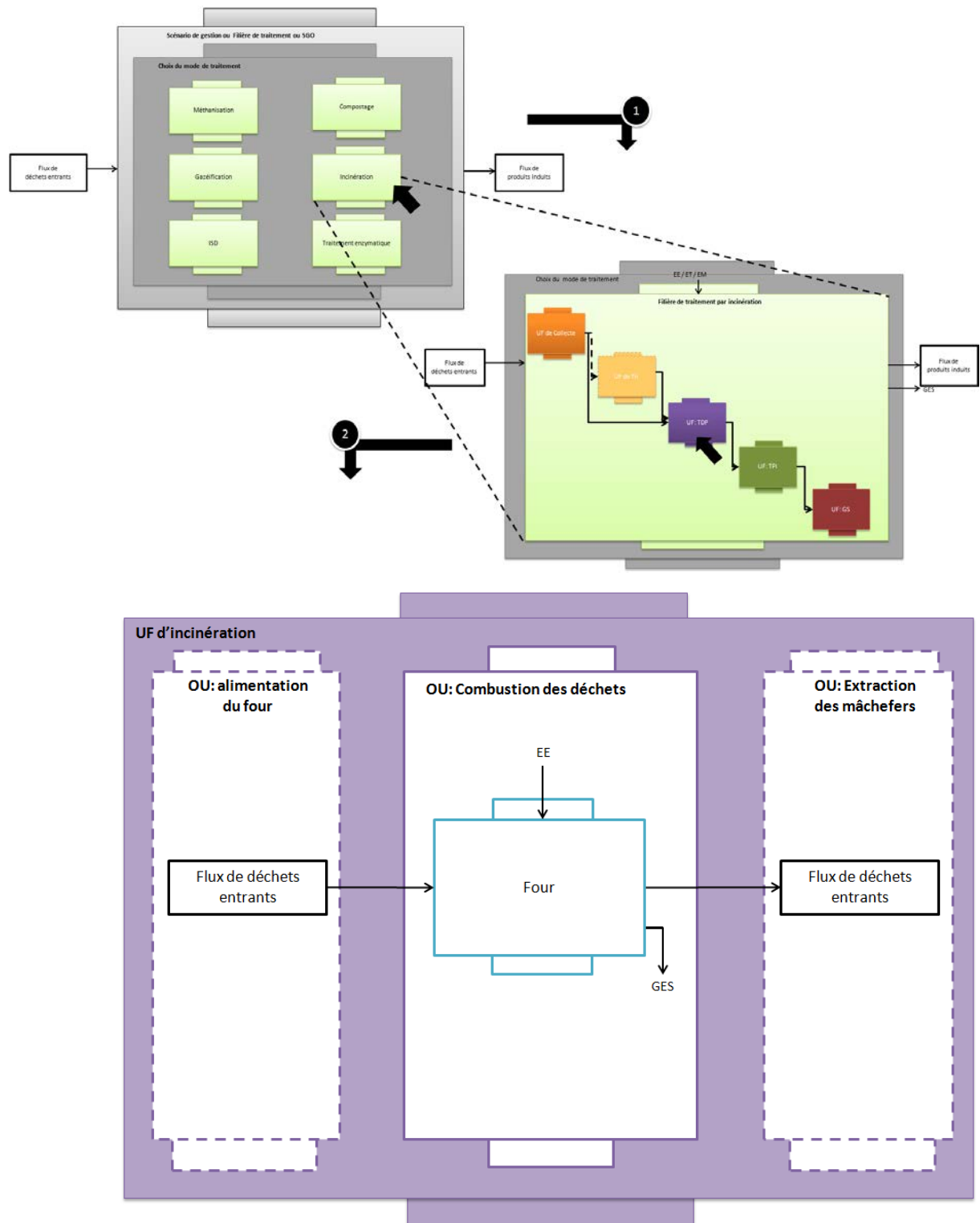
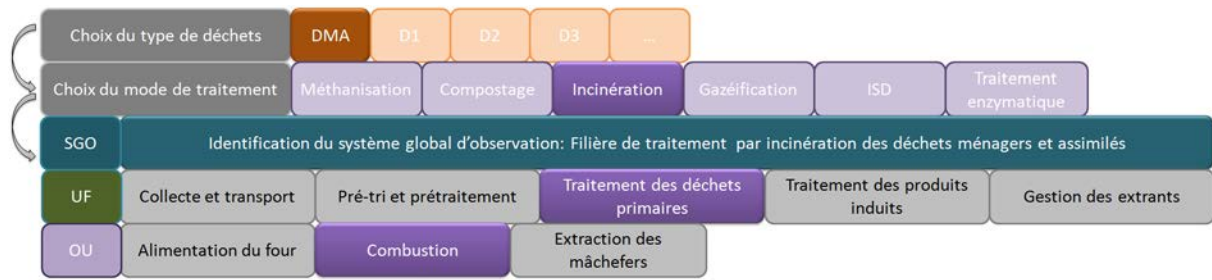


Figure 56 : Description de l'Opération Unitaire de combustion des déchets
(source : HATIK, 2015)

II.6.3.2 L'Opération Unitaire de combustion des déchets



Une fois, les déchets convoyés jusqu'au four, ils subissent une transformation par combustion au sein du four. Le four constitue donc l'unique composant de l'Opération Unitaire de combustion. Puisque que nous nous intéressons aux phases de traitement au travers notamment du stockage, de la transformation et du transport, nous avons donc isolé l'étape principale de transformation, la combustion et son lieu à savoir le four.

A la sortie du four, un flux matière est observé : les mâchefers. Après une combustion, la part valorisable thermiquement a été transformée sous forme de flux énergie et la part non valorisable thermiquement est récupérée en sortie : les mâchefers. Si l'on observe les flux énergie en entrée, il est nécessaire pour réaliser une combustion d'avoir un comburant en général l'oxygène ou l'air et un combustible comme le fioul ou autres. Il est également possible d'introduire l'énergie électrique.

Et en sortie du four, il s'agit de la part valorisable thermiquement et initialement transformée des déchets : la chaleur. Comme précédemment les paramètres structurels liés au dimensionnement du four sont identifiés ainsi que tous les paramètres de gestion (Figure 56).

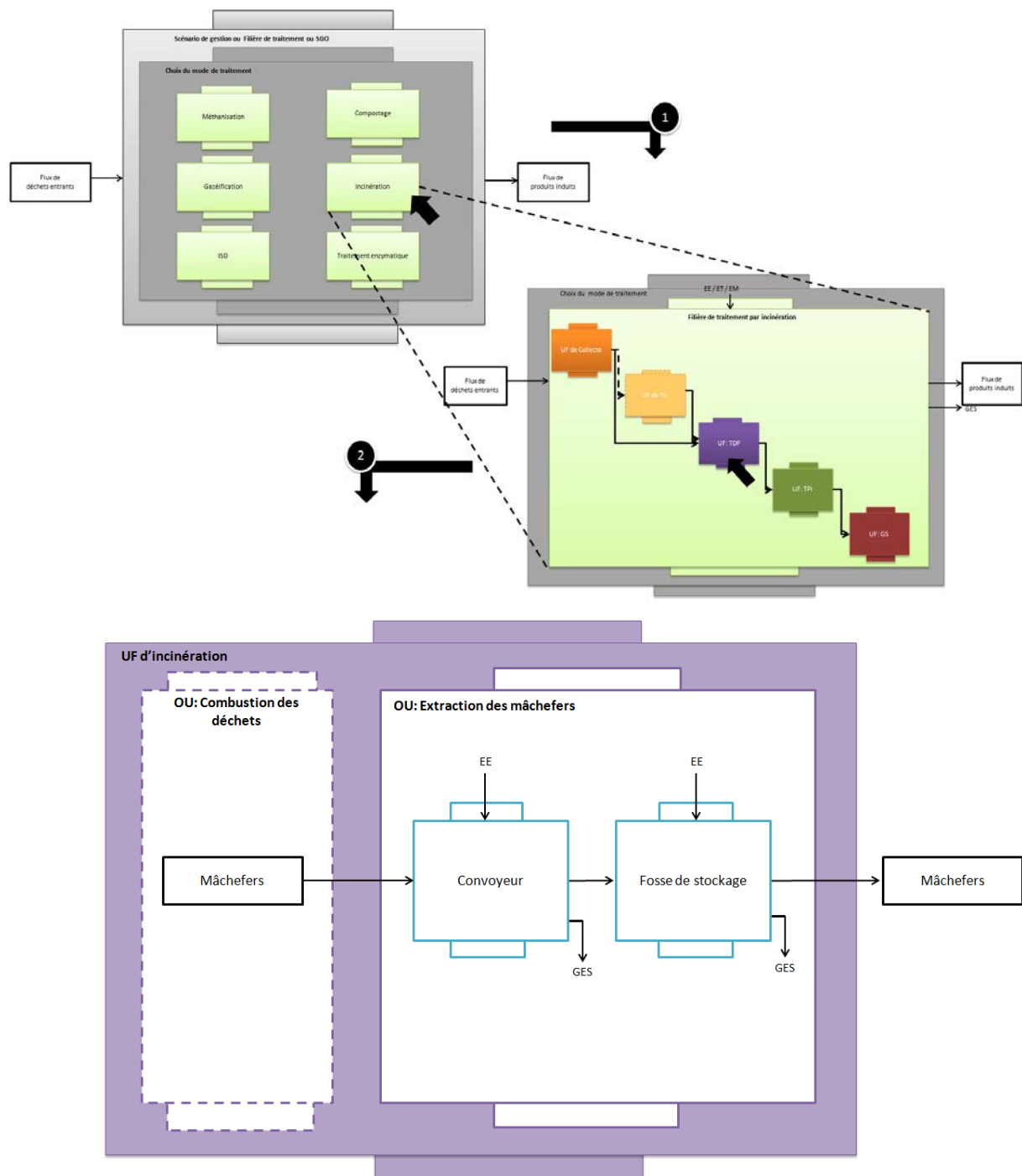
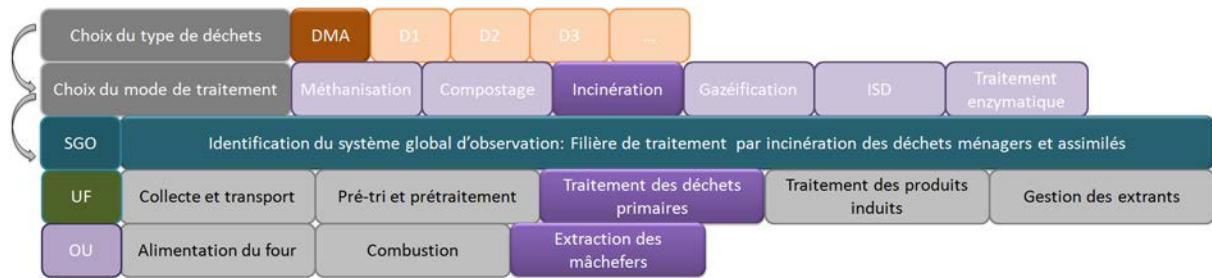


Figure 57 : Description de l'Opération Unitaire d'extraction des mâchefers (source : HATIK, 2015)

II.6.3.3 *L'Opération Unitaire d'extraction des mâchefers*



Après le passage des déchets dans le four, les déchets sont devenus mâchefers. Afin d'assurer le bon fonctionnement du four et la récupération des mâchefers, une étape d'extraction est nécessaire. Elle constitue donc la troisième et dernière étape contenue dans l'Unité Fonctionnelle qu'est l'incinérateur. Afin d'extraire le flux sortant, deux composants sont nécessaires (Figure 57) :

- 1) un extracteur ou convoyeur (tapis roulant)
- 2) une fosse de stockage.

De même, comme toutes étapes de transport ou de stockage, aucune transformation n'est notée seuls les paramètres structurels et de gestion sont retenus et identifiés. Les mâchefers, une fois extraits, sont directement acheminés en phase de gestion des extrants car ne nécessitent pas de traitement intermédiaire. En effet, les mâchefers sont des déchets dits ultimes qui vont donc être éliminés selon une autre filière de gestion.

Dans l'exemple choisi, les mâchefers produits à ce stade seront donc gérés afin d'être acheminés vers une autre filière de traitement cette fois-ci de déchets ultimes. Dans certains cas, les mâchefers peuvent subir une étape de valorisation intermédiaire comme la vitrification afin de servir en remblais routiers.

Il est important à ce stade de préciser les vocables installation de traitement et procédé de traitement ou unité de traitement. Ces deux vocables traduisent deux niveaux d'observation différents d'où l'importance de cette précision.

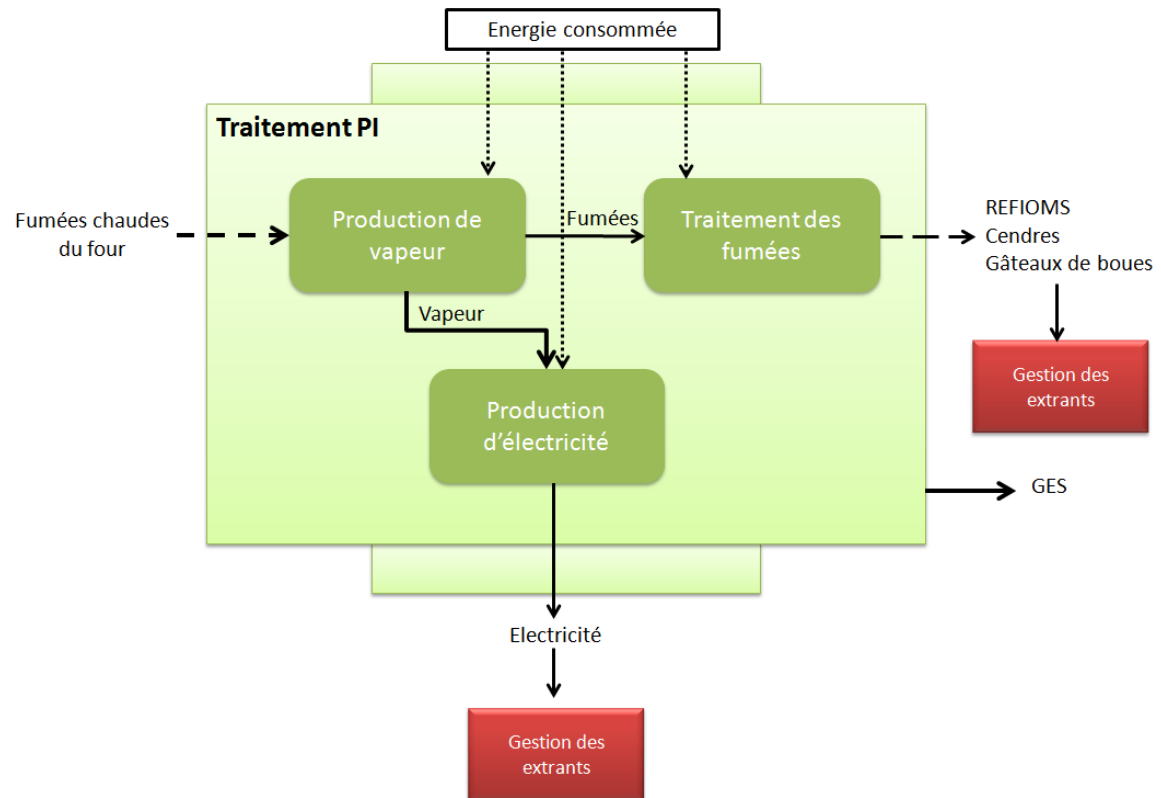
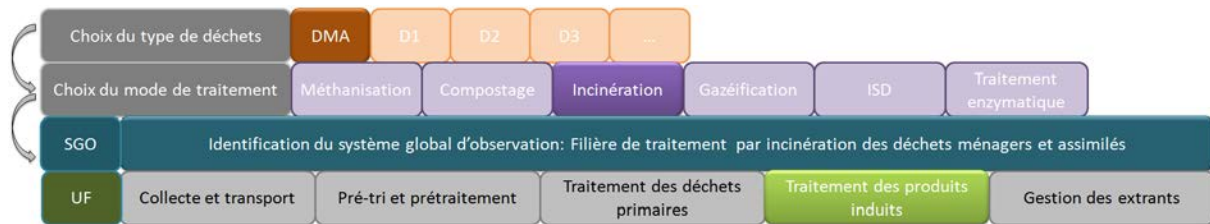


Figure 58 : Présentation de la phase de traitement des produits induits (source : HATIK, 2015)

II.6.4 **L'Unité fonctionnelle de traitement des produits induits**



L'étape de traitement des produits induits vise comme son nom l'indique à considérer tous les procédés permettant le traitement des produits induits. Les produits induits correspondent aux flux énergie et matière sortant des unités de traitement comme la vapeur, le biogaz ou encore le digestat.

En sortie des unités de traitement ces flux ne sont pas forcément utilisables directement et nécessitent donc d'être traités afin d'être valorisés. Les procédés retenus sont au nombre de 8 :

- 1) le traitement des gaz,
- 2) le traitement des fumées,
- 3) le traitement des lixiviats,
- 4) la production d'électricité,
- 5) la production de vapeur,
- 6) l'usine de recyclage,
- 7) l'installation de stockage des déchets,
- 8) la vitrification.

Comme précédemment un certain nombre d'Opérations Unitaires ont été identifiées pour chacun d'eux (Figure 58).

Les traitements des produits considérés dans notre exemple sont :

- 1) la production de vapeur
- 2) la production d'électricité,
- 3) le traitement des fumées.

Les autres procédés sont présentés à l'aide de schémas systémiques en annexe 12.

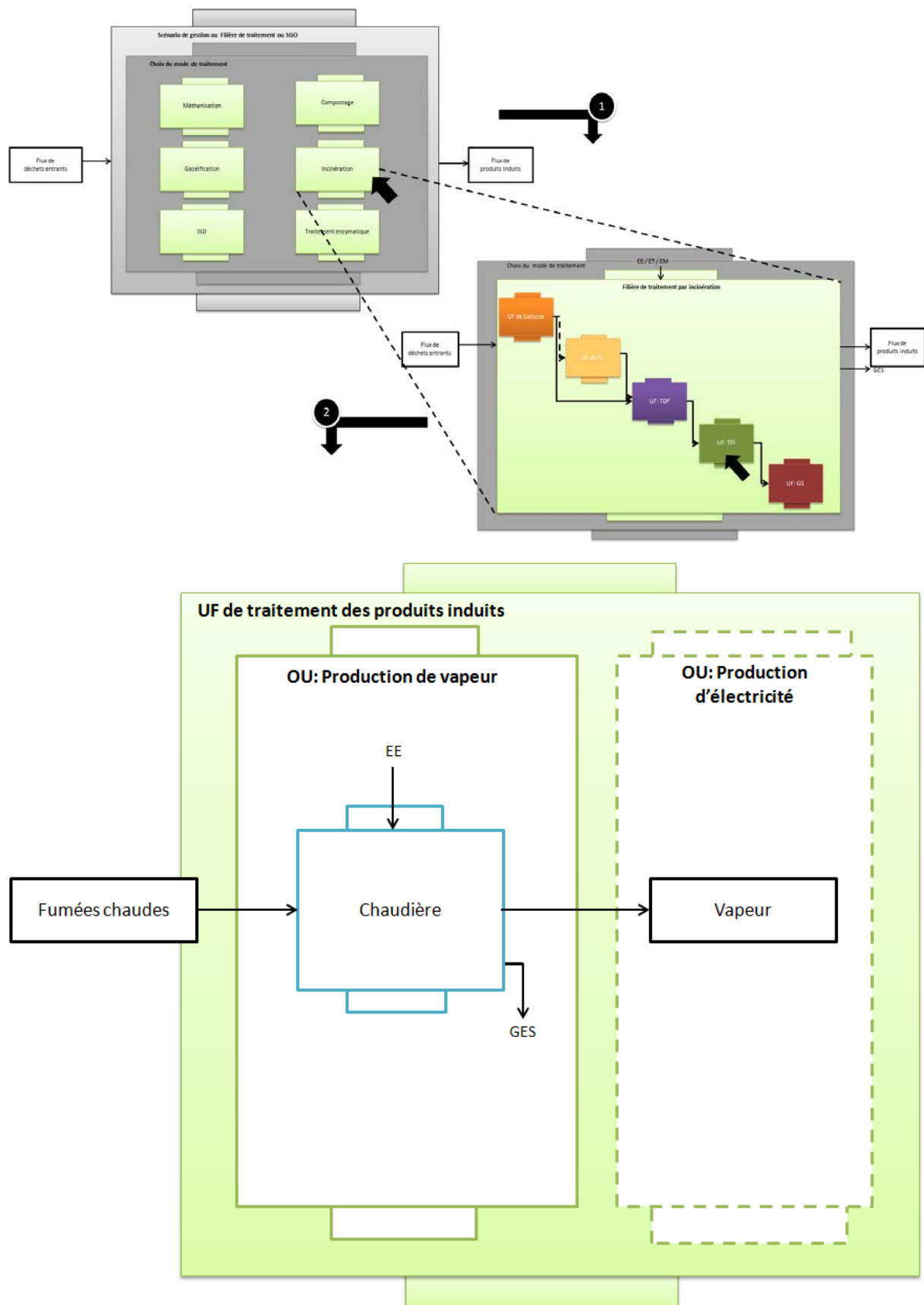
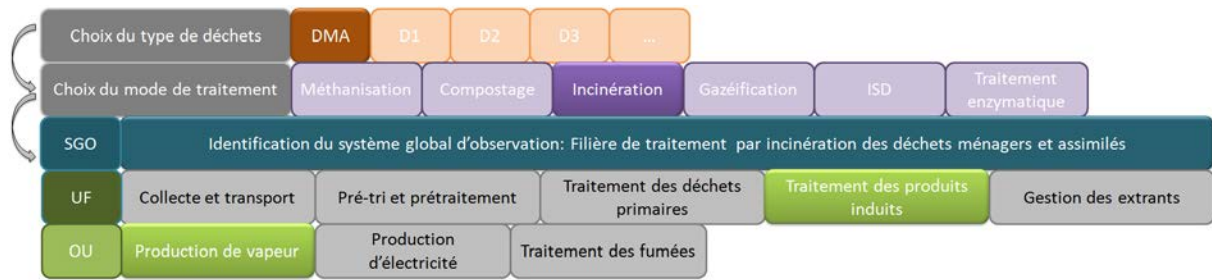


Figure 59 : Description de l'Opération Unitaire de production de vapeur d'eau
(source : HATIK, 2015)

II.6.4.1 L'Opération Unitaire de production de vapeur d'eau



Une fois, les déchets brûlés, ils sont transformés pour partie en flux énergie sous forme de chaleur. Cette chaleur sera alors introduite dans une chaudière afin de produire de la vapeur d'eau. Nous en déduisons que l'Opération Unitaire de production de vapeur est composée d'un unique composant : la chaudière.

Comme pour le four de l'incinérateur, l'attention est portée sur les axes de transformation ici la chaleur en vapeur. Cette transformation étant faite par la chaudière. Il est important de préciser à nouveau que les niveaux d'observation des composants sont libres à chaque observateur.

Nous sommes conscients qu'une chaudière peut également être décomposée en un sous-niveau supplémentaire avec par exemple la mise en évidence de pompes, d'évaporateurs, de condensateurs ou encore de ballon d'eau. Mais aucun intérêt n'est mis en exergue par une analyse plus poussée au vu de nos objectifs économiques et environnementaux (Figure 59).

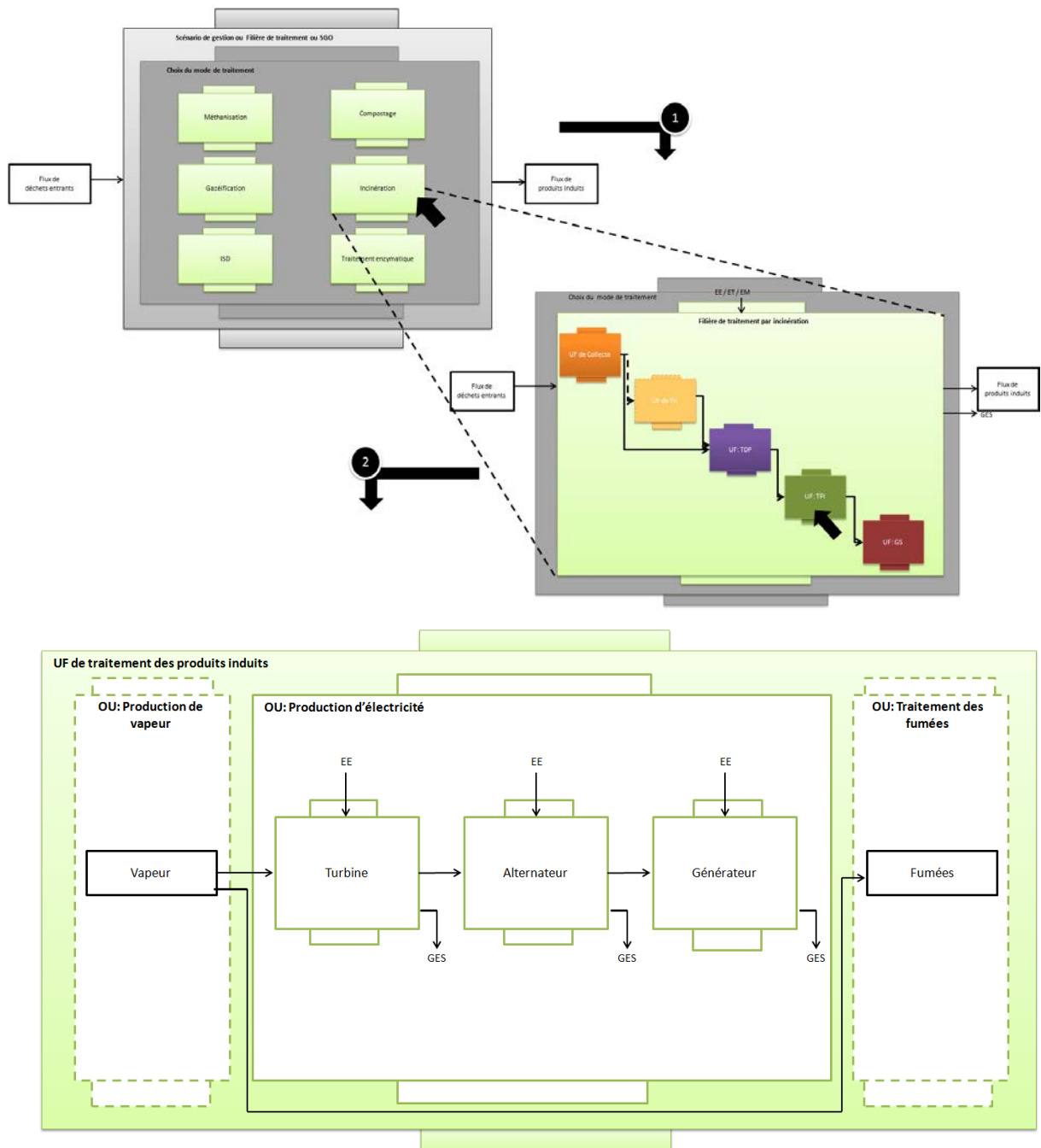
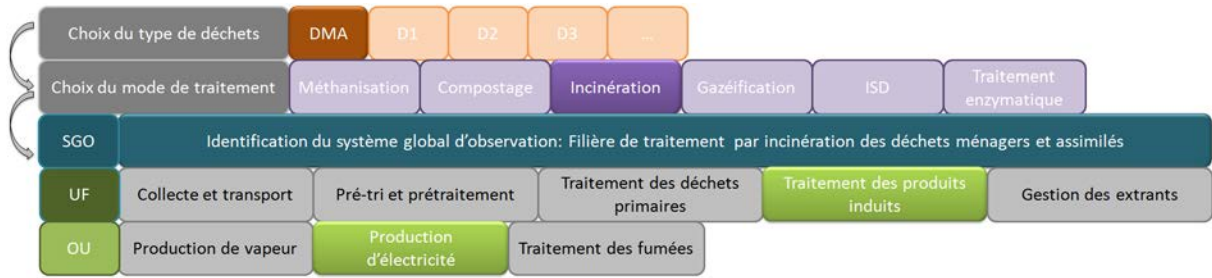


Figure 60 : Description de l'Opération Unitaire de production d'électricité
(source : HATIK, 2015)

II.6.4.2 L'Opération Unitaire de production d'électricité



La vapeur d'eau ainsi formée est injectée dans une turbine qui produit à son tour une énergie mécanique transformée par un alternateur en énergie électrique et émise sur le réseau par un générateur. Ces trois composants sont donc (Figure 60):

- 1) la turbine,
- 2) l'alternateur
- 3) le générateur

Ils constituent donc l'Opération Unitaire de production d'électricité. Parallèlement à la production d'électricité, les fumées produites par le four sont traitées en sortie de chaudière pour être épurées.

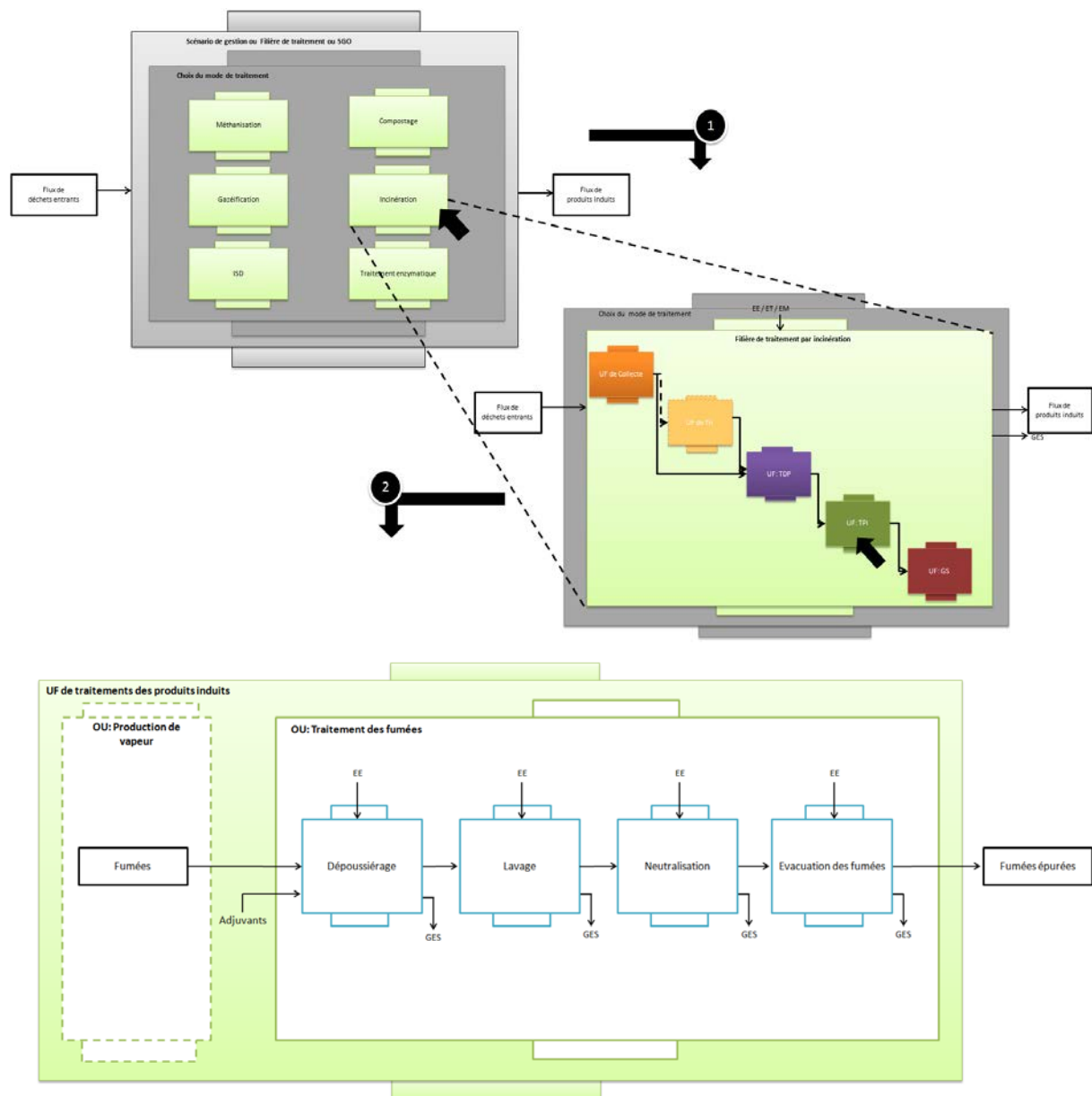
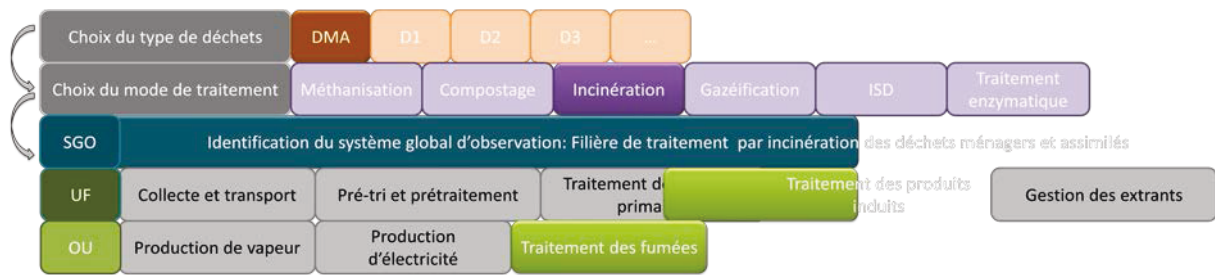


Figure 61 : Description de l'Opération Unitaire de traitement des fumées
(source : HATIK, 2015)

II.6.4.3 *L'Opération Unitaire de traitement des fumées*



A l'image de la chaîne de tri mécanique, plusieurs agencements de composants sont possibles pour le traitement des fumées. Il existe en effet un ou plusieurs procédés de traitement en fonction des technologies utilisées comme par exemple, le traitement par voies humides, par voies sèches ou encore par voies semi-humides. Selon les techniques choisies, l'association des composants sera différente mais il est d'ores et déjà possible d'établir un listing des étapes à considérer (Figure 61) :

- 1) le dépoussiérage,
- 2) le lavage,
- 3) la neutralisation
- 4) l'évacuation des fumées épurées.

L'étape de dépoussiérage peut se réaliser à partir d'un électrofiltre ou filtre à manche, un cyclone ou encore un décanteur statique. Il conviendra à l'utilisateur de préciser son choix selon la technologie utilisée. Cette étape consiste à capter les poussières des fumées par méthode d'oxydoréduction ou encore par magnétisme.

Le lavage des fumées s'effectue à l'aide de tour de lavage ou de quench. Ils permettent par pulvérisation d'eau ou de réactifs sur les fumées la récupération des particules volantes notamment des métaux lourds.

La neutralisation se réalise via un catalyseur permettant l'élimination des oxydes d'azote.

Et l'évacuation des fumées à l'aide d'un ventilateur de tirage et d'une cheminée. Toutes ces étapes sont composées d'éléments qui permettent selon leur agencement le traitement des fumées avec pour objectif le respect des normes environnementales imposées (arrêté du 20/09/02).

Comme précisé, l'outil doit donc permettre à l'utilisateur de composer sa propre chaîne de traitement des fumées au travers des 4 étapes clés du traitement. Il est à noter que ces étapes ne sont pas forcément toutes considérées dans une chaîne de traitement des fumées mais nécessitent d'être présentes dans l'outil afin de traduire toutes les possibilités.

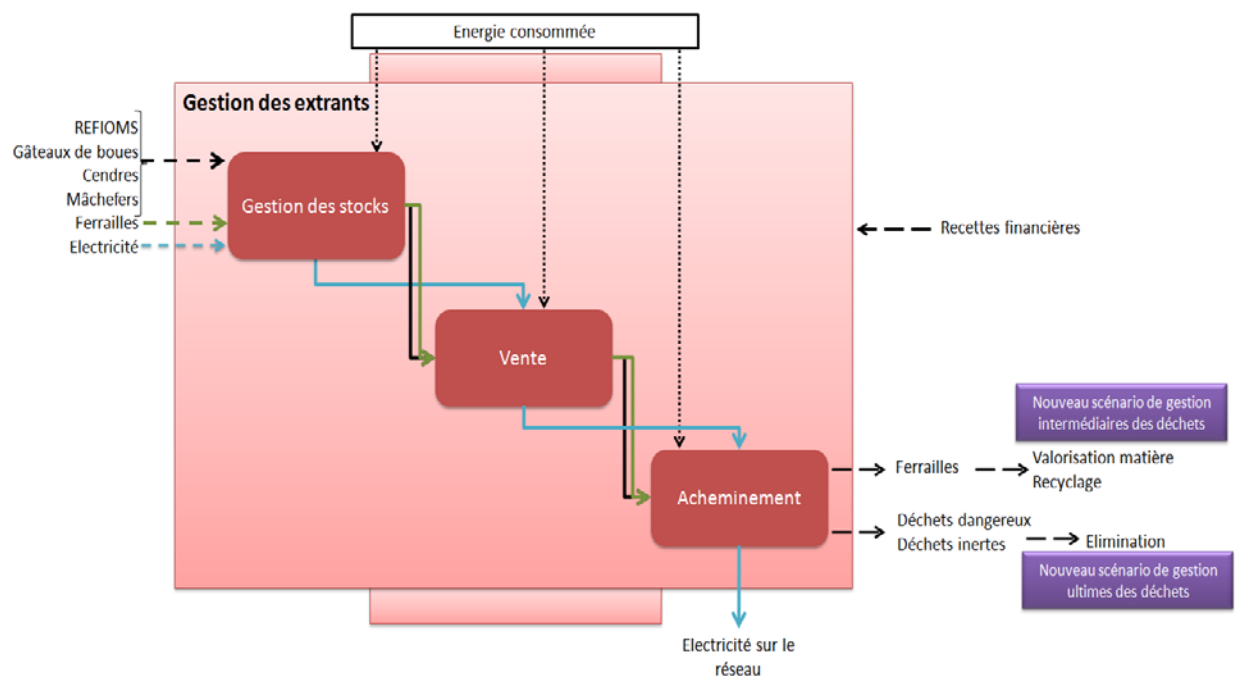
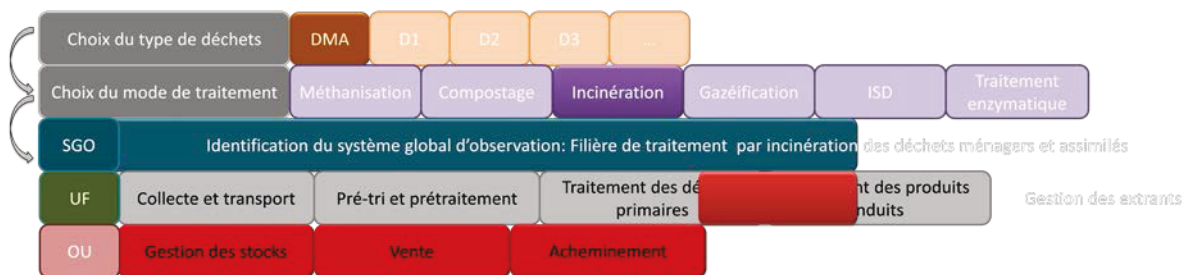


Figure 62 : Présentation de l'Unité Fonctionnelle de gestion des extrants

Le traitement des produits induits liés au procédé d'incinération se compose de trois Opérations Unitaires permettant la production d'électricité par l'intermédiaire de la chaleur produite par le four et le traitement des fumées. Les flux observés sont dans la chaleur en entrée puis la vapeur en sortie de la chaudière, puis l'énergie mécanique à la sortie des turbines, et enfin l'électricité produite en sortie de l'alternateur et du générateur.

Concernant le traitement des fumées on retiendra en sortie, les REFIOM (résidus d'épurations des fumées composées des boues de lavages et des cendres) et les fumées évacuées. Les flux matières (REFIOM et fumées) sont alors orientés vers la phase de gestion des extrants afin d'être acheminés vers une autre filière de traitement des déchets ultimes comme pour les mâchefers. Il en est de même pour les flux énergie (électricité et chaleur) qui seront gérés selon les objectifs visés. Les paramètres de gestion et structurels sont les mêmes que ceux identifiés précédemment.

II.7 L'Unité Fonctionnelle de gestion des extrants



L'étape de gestion des extrants constitue la dernière phase de gestion du système observé. Elle prend en considération les procédés nécessaires à la gestion des produits induits à savoir : la gestion des stocks produits, leur vente ou encore leur acheminement vers leur destination finale correspondant aux Opérations Unitaires. Cependant, à l'image de la collecte, aucun procédé n'a été identifié pour cette phase. (Figure 62) Cette étape se compose donc de trois Opérations Unitaires à savoir :

- 1) la gestion des stocks,
- 2) la vente des stocks (produits induits)
- 3) l'acheminement vers d'autres systèmes de gestion.

La gestion des stocks se présente comme une étape de stockage où des problématiques de gestion et d'autonomie de stockage sont considérées au travers notamment des volumes de stockages. Pour la gestion des stocks seul le coût de maintenance est pris en compte en plus des facteurs d'émissions.

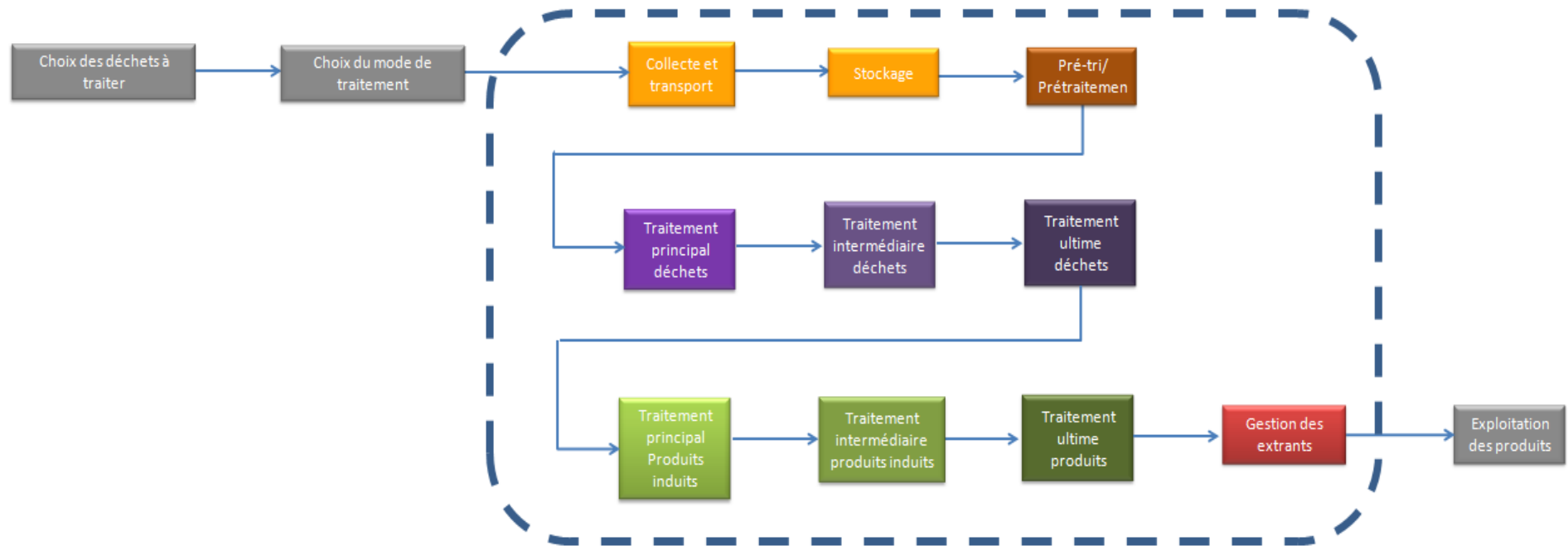


Figure 63 : Représentation générale des filières de traitement des déchets

La vente s'articule autour des quantités produites et autoconsommées par les différents procédés ainsi que les pertes pouvant être occasionnées.

La vente, dont les paramètres de gestion analysés sont principalement ceux liés au chiffre d'affaire issus de la vente des produits induits.

L'acheminement qui s'apparente à la phase de collecte où les paramètres d'entretien des véhicules ou autres moyens de transport sont considérés, les paramètres de consommation de carburant et enfin d'émissions. A l'issue de cette phase les flux matières vont s'orienter vers d'autres systèmes de gestion soit intermédiaires, soit ultimes selon leur caractère valorisable. Et les flux énergie sont exploités par des filières spécifiques selon les flux.

Dans notre cas d'étude, les flux matières sont, soit considérés comme ultimes notamment pour les REFIOM, soit comme valorisables pour les mâchefers. En effet, dans la gestion des extrants les mâchefers subissent un tri final afin d'extraire les ferrailles présentes qui suivront une filière de valorisation matière. Les mâchefers « propres » restantes peuvent être soit valorisés comme remblais routiers après vitrification (système de traitement intermédiaire) soit être éliminés (système de traitement ultimes). Les flux énergie sont quand à eux exploités sur le réseau électrique pour l'électricité produite et par valorisation thermique de la chaleur dans le cas d'une cogénération.

1. 7 Approche plus générale

La conception de l'outil comme nous avons pu le voir a nécessité une connaissance précise des éléments constituant chacun des niveaux d'observation étudiés. Cette observation du système par l'observation des flux, nous a permis de mettre en évidence les phases de traitement autour des étapes de stockage, de transformation et de transport. C'est au travers de ces indices qu'il nous a été possible d'identifier les paramètres de gestion à considérer afin de répondre à nos problématiques de coûts et d'environnement. Nous avons pu observer et analyser le système étudié à travers les niveaux d'observation (phase de gestion, procédés et Opérations Unitaires) autour des flux convectés, des paramètres structurels, fonctionnels et de gestion considérés pour la construction de l'outil de simulation. A ce stade, l'outil permet une acquisition de données détaillées à toutes les phases de gestion afin d'établir un certain nombre de scénarii de gestion des déchets. Nous avons également pris conscience de la nécessité de proposer des sorties graphiques à chaque niveau selon une navigation montante. En effet, il est nécessaire d'avoir réalisé l'acquisition de données du niveau inférieur afin d'obtenir les résultats globaux du niveau supérieur.

Le procédé général des filières de gestion et de traitement pourrait s'expliquer à partir du schéma suivant (Figure 63) :

III. Réalisation de l'Outil de simulation

L'outil de simulation a été réalisé à l'aide du logiciel Excel. Ce logiciel, nous a permis une prise en main rapide et intuitive afin de visualiser graphiquement l'outil conçu. C'est autour de deux types de navigations que nous avons choisis de procéder afin de proposer un outil simple d'utilisation. Ces navigations sont de type spatial et de type descriptif.

En préalable à toute navigation, nous ferons un choix du mode de traitement à considérer dans le scénario de gestion ainsi que celui des déchets à traiter. En effet, afin de construire un scénario de gestion plusieurs possibilités s'offre à nous. Ces choix sont à la base de l'identification et de la définition du scénario de gestion et de traitement qui sera analysé. Ce scénario correspond à la filière de traitement que nous avons dénommée plus haut : Système Global d'Observation.

La navigation spatiale ou structurelle

La navigation spatiale permet le passage d'un niveau d'observation à un autre selon un mode descendant ou horizontal. Lorsque la navigation est effectuée dans un sens descendant, elle permet de se positionner à chaque niveau ou échelle d'observation. Lorsqu'elle est horizontale elle permet d'identifier chaque sous-système composant un niveau d'observation. Nous pourrions ainsi balayer systématiquement l'ensemble des sous-systèmes composants le Système Global d'Observation, c'est à dire la filière de gestion et de traitement des déchets et les flux qui leurs sont associés. Cette navigation permet, en outre, de réaliser une acquisition de données, du Système Global d'Observation jusqu'aux Composants. Autour des descriptions des sous-systèmes, nous mènerons des acquisitions de données simplifiées qui nous seront utiles pour réaliser des ratios, des lois de corrélations et autres analyses. Le menu dit de description spatiale est situé en haut des feuilles Excel facilitant ainsi la visualisation des niveaux dans lequel se situe l'utilisateur, ainsi que le chemin parcouru concernant la description des sous-systèmes observés.

La navigation descriptive ou fonctionnelle

La navigation descriptive se réalisera dans le sens ascendant au niveau de l'outil de simulation. Elle concerne, dans un premier temps, l'ensemble des pages d'acquisition de données détaillées autour d'indicateurs de fonctionnement.

Elle concernera ensuite les phases de calcul permettant d'intégrer les informations des couches inférieures aux couches supérieures. Nous pourrions ainsi analyser des fiches de synthèse de chaque niveau de description et réaliser des sorties graphiques des principaux résultats mis en évidence. Ces sorties graphiques permettront de visualiser les informations du niveau d'observation élémentaire à l'échelle des composants aux niveaux supérieurs, à l'échelle des Opérations Unitaires, puis des unités fonctionnelles et enfin du système global d'observation.

Un menu supplémentaire est ajouté afin d'accéder directement à la visualisation des sorties graphiques pour des scénarios déjà renseignés. Elle permet en outre la navigation autour de la réalisation d'analyses statistiques plus poussées. Ce menu se situe à l'extrême gauche de la feuille Excel. Le cœur de la feuille est bien sûr le

lieu de description des sous-systèmes et des étapes de synthèse et également le lieu d'acquisition de données et de visualisation des sorties graphiques.

De plus, un système de flèches verte a été conçu afin de passer à la page suivante ou de revenir à la page précédente en plus du menu de navigation. Ces flèches sont descendantes ou horizontales lors de la phase de description spatiale et montante lors de la phase de description fonctionnelle. Un système de flèches noires est également mis en place afin d'orienter la navigation sur les différentes phases d'acquisitions de données et de calcul à réaliser.

Il est important de noter que lorsque l'on clique sur une étape de la navigation spatiale, l'utilisateur sera automatiquement dirigé vers la page de synthèse du niveau d'observation. Au cours de la navigation, quatre types de pages sont considérées à savoir :

- 1) La page de synthèse et de présentation des sous-systèmes,
- 2) La page de l'état d'avancement,
- 3) La page d'acquisition de données,
- 4) La page de sorties graphiques.

A ces pages, il faut aussi présenter la page d'accueil de l'outil et respectivement deux pages pour la navigation descriptive des déchets et des modes de traitement. Les paragraphes suivants s'attachent donc à illustrer les pages d'accueil, de navigation descriptive et de navigation spatiale. Dans un esprit de clarté, nous avons choisi de présenter distinctement la navigation dite « informative » de l'acquisition de données.

Un code de couleur a été retenu afin de situer l'opérateur de saisie de données au cours de sa navigation dans l'outil. Ce code s'applique à partir des unités fonctionnelles. A savoir, que chacune d'entre elles sera représentées par une couleur :

- Orange pour l'UF de la collecte
- Jaune pour l'UF de pré-tri et de traitement,
- Violet pour l'UF de traitement des déchets primaires,
- Vert pour l'UF de traitement des produits induits,
- Rouge pour l'UF de gestion des extrants.

Partie 1- Chapitre 3 : Conception et réalisation d'un outil de simulation de gestion et de traitement des déchets



Figure 64 : Identification et choix des déchets à traiter

Figure 65 : Information sur le déchet à traiter



Figure 66 : Identification et choix du mode de traitement

III.1 Explicitation d'un scénario de gestion et de traitement autour des typologies de déchets et des modes de traitement

III.1.1 Le choix des déchets à traiter

Le premier choix à effectuer dans la construction de scénario de gestion des déchets est celui des déchets à traiter. En effet, comme nous avons pu le voir jusqu'à présent c'est la nature du déchet et sa qualité qui conditionne la chaîne de gestion. Il est donc primordial dans la réalisation de l'outil d'intégrer une page permettant ce choix.

La page présente un système de type boîte où seules les entrées et sorties sont visibles. A ce stade le système qui n'est pas encore explicité est considéré comme une boîte noire. Il fera l'objet d'une description graduelle à mesure qu'on avancera dans la description (Figure 64).

Un point d'information sur le contenu du système et ces étapes d'acquisition de données est néanmoins inséré afin de visualiser le chemin à parcourir.

Une fois, le choix du déchet à traiter effectué, une page de présentation synthétique sur le déchet sélectionné est définie ainsi qu'une première étape d'acquisition de données sur ce flux. Les paramètres de description du flux entrant sont divers selon les objectifs d'analyse que nous souhaitons développer (Figure 65).

Selon notre exemple de départ, nous considérons ici les déchets ménagers et assimilés.

III.1.2 Le choix du mode de traitement

Une fois, le déchet à traiter choisi, il est nécessaire de déterminer le mode de traitement. Il est important de préciser qu'un grand nombre de mode de traitement est possible selon les déchets étudiés. Mais dans un esprit de synthèse, une fois le déchet choisi seuls les modes de traitement spécifiques ou pouvant être adaptés à ce flux sont présentés.

La page affiche donc les modes de traitement disponibles pour le traitement des déchets ménagers à savoir : le compostage, la méthanisation, l'incinération, la gazéification, l'installation de stockage et le traitement enzymatique. Pour chacun de ces modes est présenté une petite fiche synthétique comme pour les déchets observés. Dans la construction de scénarios de gestion et par conséquent de filières de traitement, nous avons souhaité un outil permettant le choix de plusieurs modes de traitement afin d'élaborer des scénarios complets et voir innovants (Figure 66).

Une fois, l'acquisition de données réalisée pour le premier mode de traitement, l'utilisateur pourra effectuer un deuxième choix et ainsi combiner un ou plusieurs modes de traitement. L'outil propose une combinaison allant jusqu'à 4 modes de traitement différents.

Partie 1- Chapitre 3 : Conception et réalisation d'un outil de simulation de gestion et de traitement des déchets

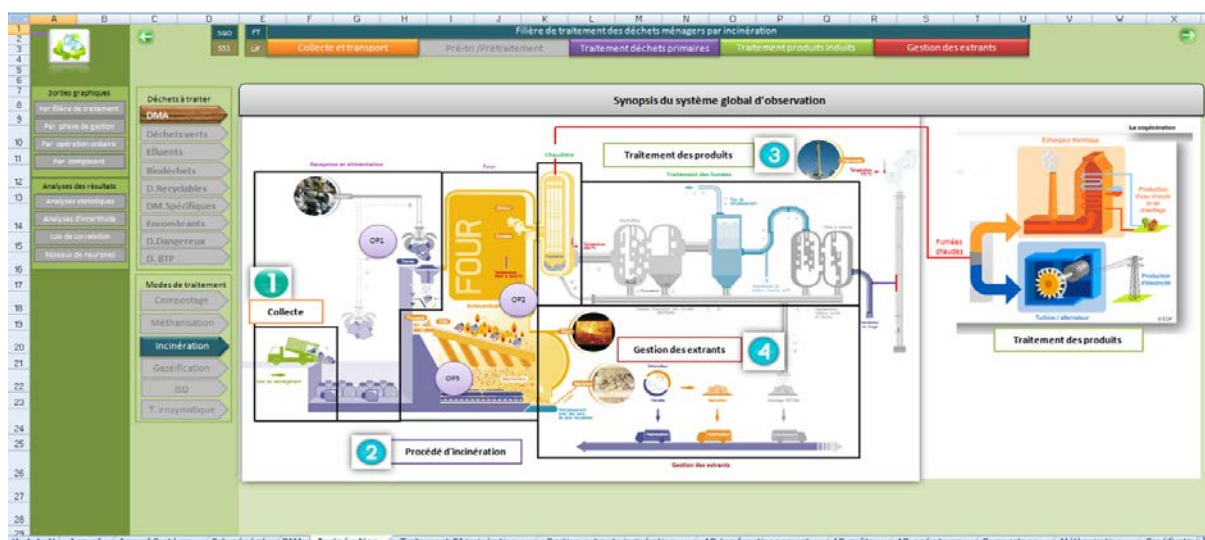


Figure 67 : Description synoptique de la filière de traitement

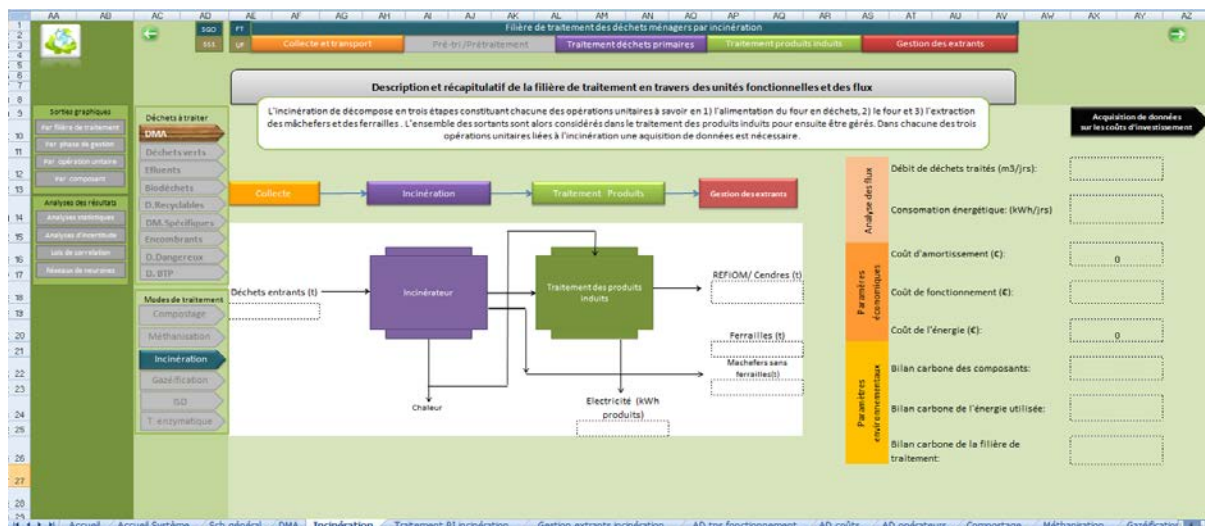


Figure 68 : Description systémique de la filière de traitement

Généralement une filière de traitement des déchets ne prend en compte qu'un seul type de mode de traitement, par exemple, le tout à l'incinérateur, le tout à l'enfouissement...

Bien que la gestion des biodéchets a permis de changer cet aspect mono-traitement par l'association par exemple de la méthanisation et du compostage par la création d'unité de traitement biologique et mécanique (TMB). C'est dans cette optique que nous avons réalisé l'outil afin de favoriser la créativité des utilisateurs dans leur recherche de solutions innovantes à un problème de gestion.

Pour l'illustration de notre outil nous choisirons pour le mode de traitement, l'incinération.

III.2 Identification et Explicitation du système global d'observation ou filière de gestion et de traitement

Le Système Global d'Observation ou filière de traitement sera développé dans un classeur qui sera organisé pour décrire toutes les échelles d'observation. Il constituera en outre un scénario de gestion. Nous développerons chaque SS1 ou unité fonctionnelle au niveau d'une feuille de calcul et chaque SS2 ou Opération Unitaire au niveau de pages que nous mettrons en œuvre au sein des feuilles de calcul consacrées à une unité fonctionnelle donnée. Dans le cas où nous avons plusieurs modes de traitement, nous les identifierons par des feuilles de calcul de couleur différentes.

Le système global d'observation sera présenté par un synopsis décrivant de manière synthétique le procédé global de la filière de traitement observée (Figure 67).

Une seconde page est générée en relation avec une description systémique à l'échelle du système global d'observation. La description systémique consiste notamment à identifier les différents sous-systèmes de l'échelle d'observation inférieure, ici les sous-systèmes SS1, autour des phases de gestion:

- de collecte,
- de traitement des déchets primaires,
- de traitement des induits
- de gestion des extrants

L'acquisition des données réduites sera menée sur cette page, éventuellement complétée par d'autres pages d'acquisition si nécessaire selon les filières de traitement (Figure 68).

Plus globalement nous présentons sur ces pages des informations quantitatives sur les caractéristiques globales de la filière de traitement. Certaines de ces caractéristiques sont des données et d'autres sont des résultats de calcul remontant des phases ultérieures de description.

Partie 1- Chapitre 3 : Conception et réalisation d'un outil de simulation de gestion et de traitement des déchets



Figure 69 : Etat d'avancement de la description

Description et récapitulatif de l'étape de collecte

La collecte

Mode d'organisation de la collecte dans lequel le contenant est affecté à un groupe d'usagers nommément identifiables, et le point d'enlèvement est situé à proximité immédiate du domicile de l'usager ou du lieu de production des déchets.

Paramètres économiques

- Capacité de collecte (t/jrs):
- Nombre de camions:
- Nombre de kilomètres par jour:
- Coût des opérateurs (€):
- Coût de maintenance (€):
- Bilan carbone opérateur:
- Bilan carbone de la phase de gestion:

Figure 70 : Page de description de l'UF de Collecte et de Transport

Une page de navigation permettant de se situer dans le processus de description est proposée afin de faciliter l'observation des niveaux de description (Figure 69).

Toute la description spatiale à différents niveaux d'observation sera conduite sur le même principe.

III.3 Identification et Explicitation des Unités Fonctionnelles SS1i

III.3.1 UF1 : La collecte et le transport

Cette Unité Fonctionnelle dans le cas présent ne comporte qu'une Opération Unitaire. Dans d'autres situations, on peut envisager d'autres configurations. Il n'y a pas lieu de distinguer ici représentation synoptique et représentation systémique à cette échelle d'observation. Sur une même page, nous pouvons donc rapporter tous les éléments de description autour de l'identification des SS2, des acquisitions de données réduites et des résultats de calcul. Des pages de calcul intermédiaires peuvent cependant être proposées pour répondre à toutes les explorations nécessaires (Figure 70).

III.3.2 UF2 de Traitement Pré-tri et prétraitement

La phase de traitement Pré Tri et prétraitement n'existe pas dans le cas de la filière de traitement incinération en raison du déchet observé et du mode de traitement choisi.

Comme exposé dans l'étape de conception, l'UF de pré-tri et de prétraitement se compose de 2 Opérations Unitaires :

- Le tri mécanique,
- Le prétraitement biologique.

Ces Opérations Unitaires dans le cas des autres procédés nécessitant un prétraitement des déchets sont introduites par un schéma synoptique permettant de suivre le cheminement à parcourir au sein de l'OU. A ce schéma, un tableau des données synthétiques des paramètres considérés est présenté. Ces résultats seront automatiquement calculés une fois l'acquisition de données réalisée à l'échelle des composants.

Des flèches de navigation sont également présentes afin de permettre une navigation horizontale vers l'UF suivant (traitement des déchets) et une pour l'acquisition de données des coûts d'investissement. En effet, nous avons jugé plus opportun d'étudier les coûts d'investissement à l'échelle des UF qu'à l'échelle des composants. Une navigation vers le niveau inférieur d'observation est également considérée.

Partie 1- Chapitre 3 : Conception et réalisation d'un outil de simulation de gestion et de traitement des déchets

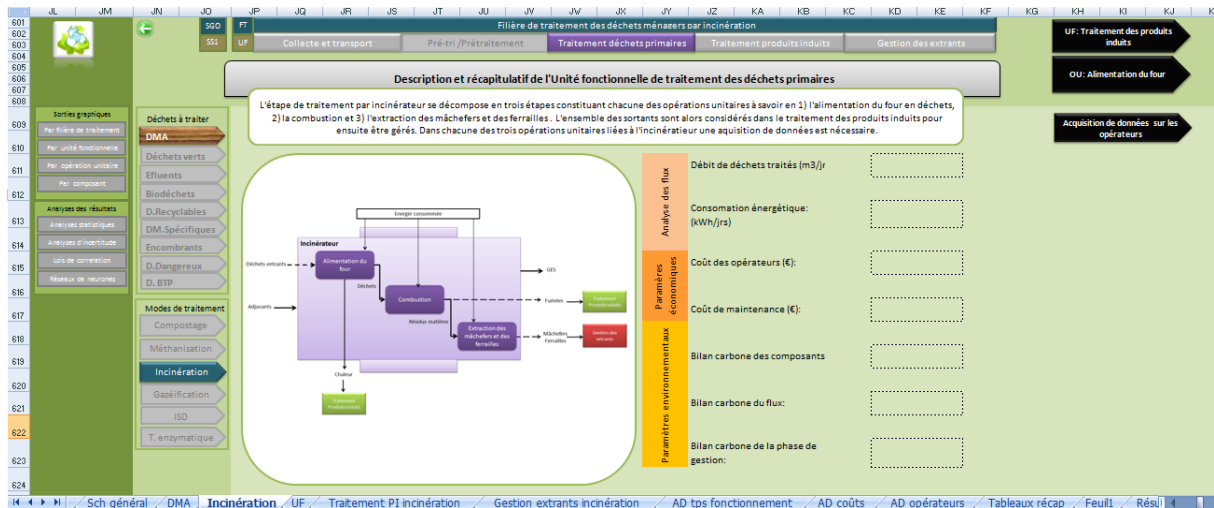


Figure 71 : Page de description de l'UF Traitement des déchets primaires

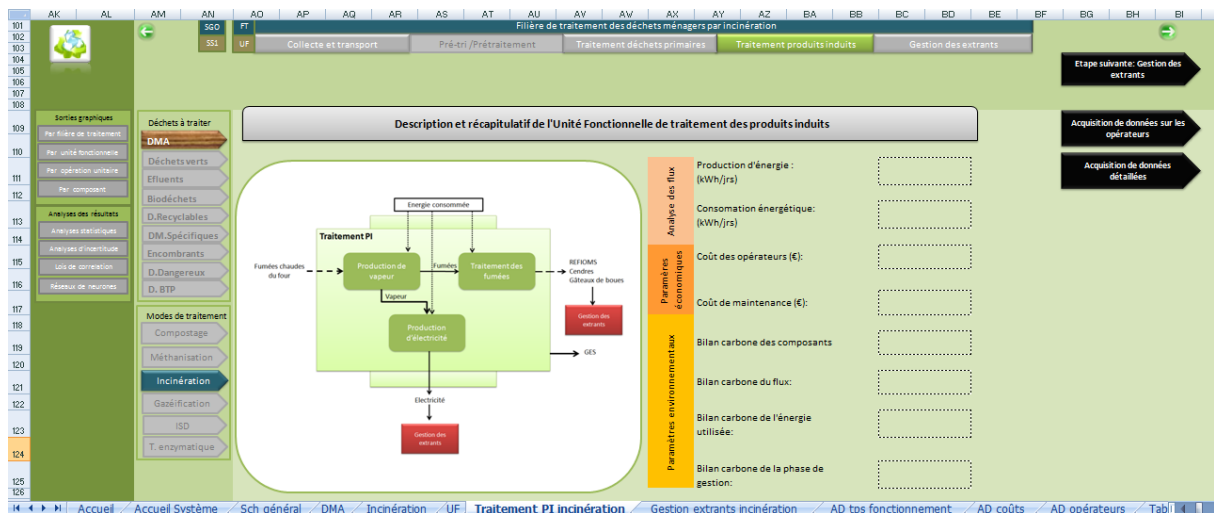


Figure 72 : Page de description de l'UF de Traitement des produits induits

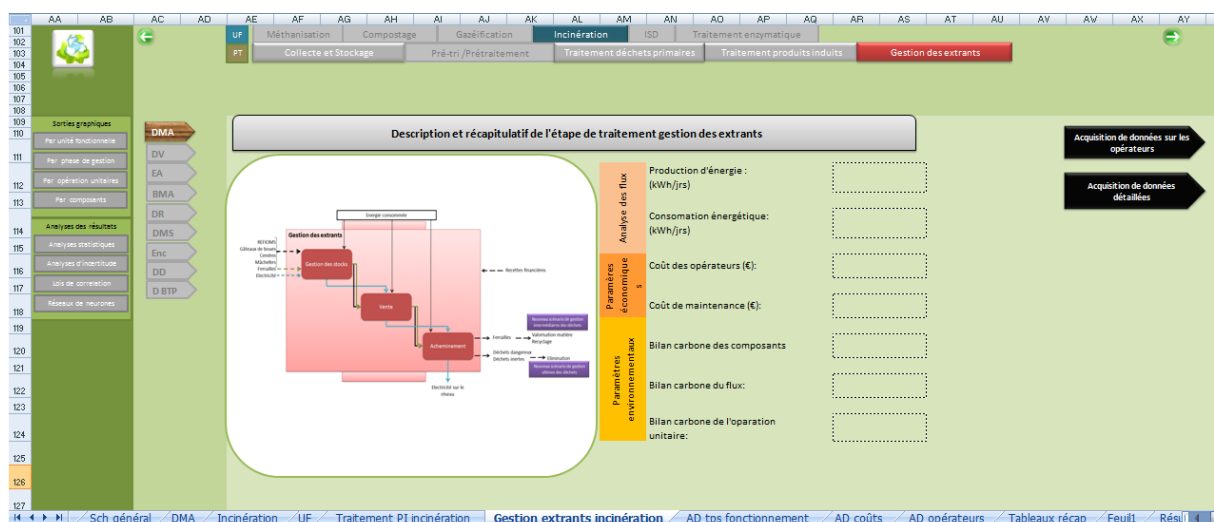


Figure 73 : Page de description de l'UF de gestion des stocks

III.3.3 **UF3 de Traitement des déchets primaires**

Cette UF comporte 3 Opérations Unitaires :

- Alimentation du four,
- Combustion des déchets,
- Extraction des mâchefers et ferrailles.

Nous les décrivons directement à partir d'une représentation systémique. Cette page de description comporte également des données de calcul récapitulatives autour d'indicateurs de fonctionnement propre à l'UF considérée. Des onglets de navigation permettent de d'accéder à des pages d'acquisitions de données réduites (Figure 71).

III.3.4 **UF4 de Traitement des produits induits**

Cette UF comporte 3 Opérations Unitaires :

- Production de vapeur
- Production d'électricité
- Traitement des fumées

La page de description de cette unité est construite de la même manière que les autres pages de description des UF (Figure 72):

Représentation systémique des sous-systèmes de niveau inférieurs identifiés (SS2)

- Identification des flux.
- Acquisition de données réduites
- Synthèses des informations calculées à partir des données des couches inférieures de description.

Les acquisitions de données réduites s'appuient sur des pages d'acquisition de données accessibles par un onglet de navigation.

III.3.5 **UF5 de Gestion des extrants**

Cette UF comporte 3 Opérations Unitaires (Figure 73) :

- Gestion des stocks
- Vente
- Acheminement

Partie 1- Chapitre 3 : Conception et réalisation d'un outil de simulation de gestion et de traitement des déchets

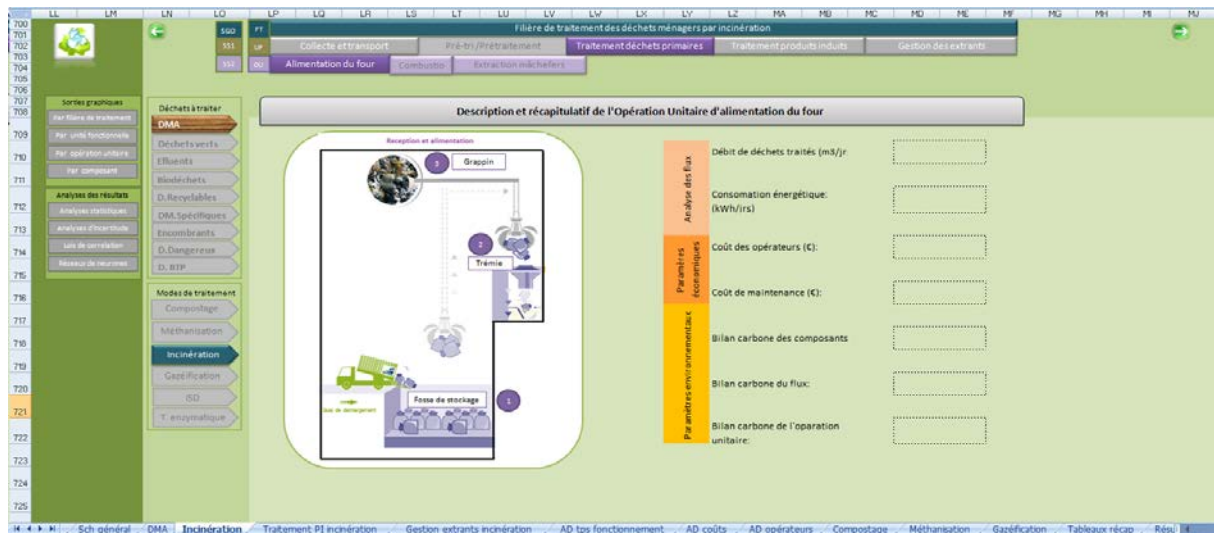


Figure 74 : Page de description de l'OU d'alimentation du four

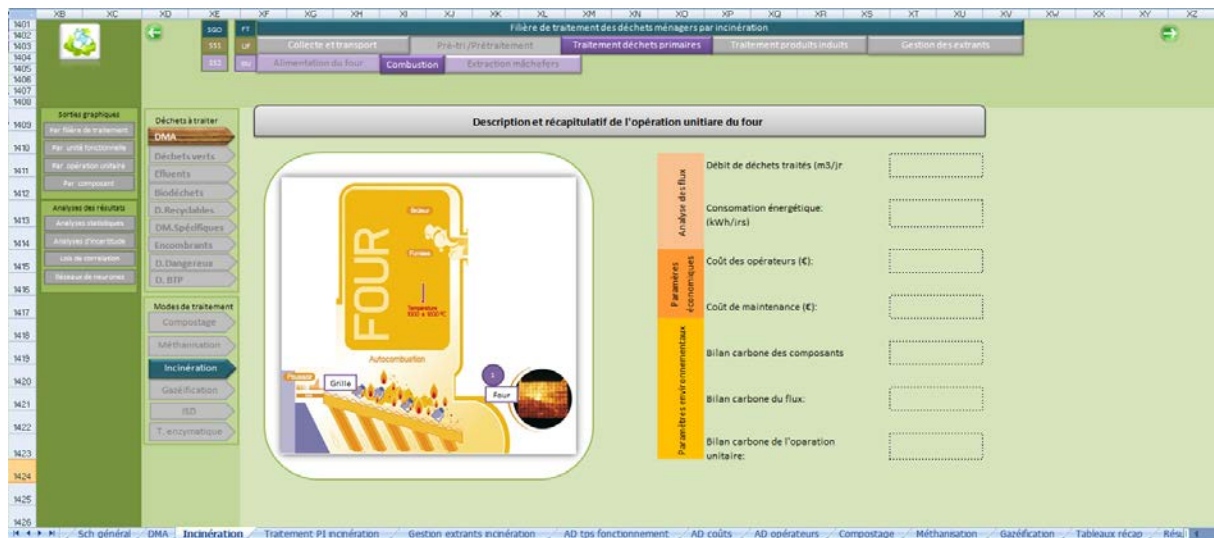


Figure 75 : Page de description de l'OU de Combustion des déchets

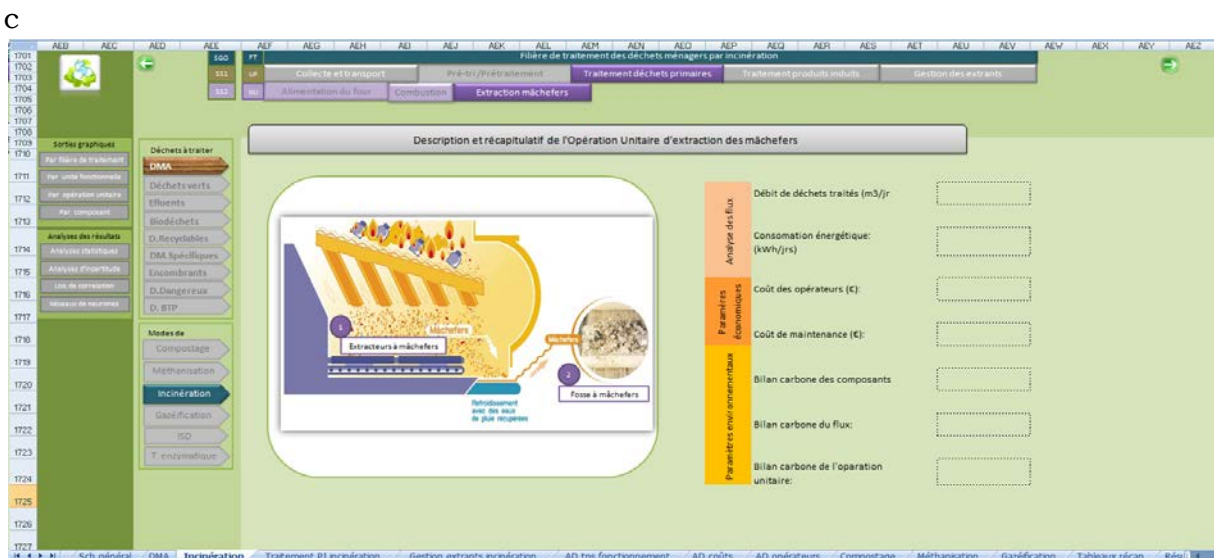


Figure 76 : Page des descriptions de l'OU d'Extraction des mâchefers

Cette dernière page est structurée de manière identique aux autres pages de présentation des UF. L'ensemble des sous-systèmes de l'échelle d'observation SS1, se décrivent de manière identique. Seuls leur nombre et dénomination varient selon les filières de traitement, nous avons un modèle générique de description qui s'applique à tous les UFi.

III.4 Identification et Explicitation des Opérations Unitaires

Nous avons dans l'illustration choisie, un total de 10 Opérations Unitaires à décrire. Nous structurons la description de ce niveau SS2 d'observation de manière identique à la description des UF (niveau SS1).

Nous avons à :

- identifier les composants de chaque Opération Unitaire,
- identifier les flux de matière et d'énergie,
- réaliser les acquisitions de données réduites,
- présenter une synthèse des résultats résultant des calculs de niveau inférieur.

Dans certain cas il serait intéressant de considérer des sous Opérations Unitaires. Nous contournerons toujours cette nécessité, afin d'harmoniser nos descriptions

Si nous considérons par exemple l'Opération Unitaire: alimentation du four, nous dénombrons 3 composants ou appareils (Figure 74) :

- Fosse de stockage,
- trémies,
- grappin.

Acquisition de données liées à l'alimentation du four

Récapitulatif des résultats pour l'alimentation du four

Cliquez sur les composant pour réaliser l'acquisition de données

	Analyse des flux et des procédés			Paramètres économiques et environnementaux		
	Débit			Consommation énergétique		
	Débit journalier (m3/jrs)	Débit mensuel (m3/ms)	Débit annuel (m3/an)	Consommation journalière	Consommation mensuelle	Consommation annuelle
Fosse de stockage	0	0	0			
Trémie	0	0	0	0	0	0
Grappin	0	0	0	0	0	0
Total données	0	0	0	0	0	0

Figure 77 : Page d'acquisition de données pour l'OU d'alimentation du four

Acquisition de données liées au four

Récapitulatif des résultats pour le four

Cliquez sur le composant pour réaliser l'acquisition de données

	Analyse des flux et des procédés			Paramètres économiques et environnementaux		
	Débit			Consommation énergétique		
	Débit journalier (m3/jrs)	Débit mensuel (m3/ms)	Débit annuel (m3/an)	Consommation journalière	Consommation mensuelle	Consommation annuelle
Four	0	0	0	0	0	0

Figure 78 : Page d'acquisition de données pour l'OU de combustion des déchets

Acquisition de données liées à l'extraction des mâchefers

Récapitulatif des résultats pour l'extraction des mâchefers

Cliquez sur un composant pour réaliser l'acquisition de données

	Analyse des flux et des procédés			Paramètres économiques et		
	Débit			Consommation énergétique		
	Débit journalier (m3/jrs)	Débit mensuel (m3/ms)	Débit annuel (m3/an)	Consommation journalière	Consommation mensuelle	Consommation annuelle
Fosse de stockage	0	0	0	0	0	0
Extracteur	0	0	0	0	0	0
Total données	0	0	0	0	0	0

Figure 79 : Page d'acquisition de données pour l'OU d'extraction des mâchefers

III.5 Identification et caractérisation des composants

Nous sommes ici à la frontière des étapes de descriptions spatiales où nous ne faisons intervenir que des données réduites et fonctionnelles où interviennent les données détaillées.

Ces données détaillées sont plus en relation avec les flux d'activités que les flux d'équipement en relation avec les composants qui réalisent les Opérations Unitaires (SS2).

Notons que les sous-systèmes SS1 et le système global d'observation peuvent être également identifiés comme des flux matières que nous identifions sous les vocables flux gros-œuvre et flux second-œuvre. Ils constituent néanmoins les infrastructures et superstructures associées plus aux systèmes et aux sous-systèmes qu'aux flux. On pointe ici les limites de nos choix sémantiques. Il en est de même pour les pages de description des Opérations Unitaires combustion des déchets et extraction des produits induits (Figure 75 et Figure 76).

Nous avons identifié une trentaine de composants qui interviennent de manière organisée dans la filière de traitement selon un procédé de traitement clairement défini.

Chacun de ces composants que nous ne considérerons pas de manière individuel car nous les regroupons au sein de chaque Opération Unitaire vont faire l'objet d'une opération de caractérisation à travers des données détaillées.

Nous procéderons ici comme aux niveaux supérieurs à partir de pages génériques que nous adapterons dans la forme pour décrire chaque Opération Unitaire.

La trame d'acquisition sera toujours la même, ce qui revient à considérer que nous gardons toujours les mêmes indicateurs de fonctionnement quels que soient les composants observés. Pour l'essentiel ces indicateurs décrivent les quantités de flux, les énergies consommées, les émissions carbone, les coûts d'investissement, de maintenance, d'opérateurs, les volumes traités. Nous distinguerons les paramètres de gestions et les paramètres de procédés en les présentant sur 2 feuilles juxtaposées.

Nous présentons la première couche des pages juxtaposées de description et d'acquisition de données pour l'Opération Unitaire, alimentation du four (Figure 77), pour l'Opération Unitaire combustion des déchets (Figure 78) ainsi pour l'Opération Unitaire extraction des mâchefers (Figure 79).

III.6 Explicitation des pages d'acquisition de données

L'acquisition de données s'effectue de manière détaillée à l'échelle des composants. Pour chacune des Opérations Unitaires une liste des composants est effectuée. Et pour chacun des composants une liste détaillée des paramètres à considérer sont exposés. Dans la mesure du possible ces paramètres ont été élaborés selon des blocs génériques comme pour les tableaux de synthèse. On retrouvera donc les mêmes informations à renseigner pour chacun des composants de chacune des Opérations Unitaires et quelle que soit l'unité fonctionnelle. Une fois, l'acquisition de données réalisée à l'échelle du composant, il est alors possible de remonter dans

la navigation afin d'observer la synthèse des résultats pour les niveaux supérieurs ainsi que les sorties graphiques.

III.6.1 L'acquisition de données à l'échelle des composants

Les tableaux d'acquisition de données se présentent selon deux volets : un volet analyse des flux (Figure 80) et un volet paramètres économiques (Figure 81) et environnementaux. De la même façon, les tableaux d'acquisition de donnée des opérateurs à l'échelle d'Opérations Unitaires seront identiques. Les cellules colorées représentent des résultats automatiques, au fur et à mesure de l'entrée des données les paramètres principaux seront automatiquement déterminés et remontés sur la page récapitulative des résultats (Figure 77, Figure 78, Figure 79).

Acquisition de données liées au four										
Analyse des flux et des procédés				Paramètres économiques et environnementaux						
Type d'équipement	Nombre d'équipement	Caractéristiques flux entrant			Caractéristiques composant		Temps d'utilisation			Energie produite/rs (kWh)
		Type de flux entrant	Capacité de traitement (t/hrs)	Puissance consommée (kW)	Rendement composant (ratio)	Dimensionnement volumique (m ³)	Temps d'utilisation	Temps d'utilisation	Temps d'utilisation	
Four	1	DMA	10	5000	1	100	24	168	6912	0,864

Figure 80 : Page d'acquisition de données de l'analyse des flux pour le composant Four de l'OU Combustion

Acquisition de données liées au four									
Analyse des flux et des procédés				Paramètres économiques et environnementaux					
Durée de vie du composant	Coût amortissement		Coût de maintenance		Coût de l'énergie consommée		Facteur d'émission (FE)		
DV/ an	Coût d'installation du composant	Coût d'achat du composant	Coût d'entretien unitaire (€)	Fréquence d'entretien par an	Prix unitaire du kWh	FE du composant	FE du flux	FE de l'énergie utilisée	
25	10000	50000	1000	4	0,13				

Figure 81 : Page d'acquisition de données économiques et environnementales pour le composant Four de l'OU Combustion

Les données calculées sont donc liées aux paramètres liés aux flux, aux paramètres économiques et environnementaux. Les données calculées au niveau des flux sont essentiellement le débit lié à la capacité de traitement et à la consommation énergétique du composant. Ces calculs sont effectués comme suit :

1) Le débit :

$$Q_V = C_t \times t$$

Avec,

Q_V , le débit en m³/an,

C_t , la capacité de traitement du composant (m³),

t , le temps d'utilisation par an.

2) La consommation d'énergie :

$$C_{\bar{e}} = P_w \times t$$

Avec,

$C_{\bar{e}}$, la consommation d'énergie en kWh/an,

$P_{w\Box}$, la puissance du composant en kW,

$\Box t$, le temps d'utilisation par an.

Concernant les paramètres économiques, nous nous intéressons aux coûts d'amortissement du composant, aux coûts de maintenance et aux coûts liés à la consommation énergétique comme suit :

3) Les coûts d'amortissement :

$$C_A = \frac{C_u \times C_i}{DV}$$

C_A , le coût d'amortissement du composant sur la durée de vie (€),

C_u , le coût d'achat du composant (€),

C_i , le coût de l'installation du composant (€),

DV, la durée de vie du composant.

4) Les coûts de maintenance :

$$C_m = C_{ent} \times F_e$$

Avec,

C_m , le coût de maintenance (€),

C_{ent} , le coût unitaire d'un entretien (€),

F_e , la fréquence d'entretien (nombre d'intervention) par an.

5) Les coûts à la consommation d'énergie :

$$C_{kWhhh} = C_{\bar{e}} \times P_{kWh}$$

Avec,

C_{kWhhh} , le coût de l'énergie,

P_{kWh} , le prix du kWh €.

Les calculs autour des paramètres environnementaux considèrent le bilan carbone du composant, du flux et de l'énergie utilisée comme suit :

6) Le bilan carbone du flux :

$$BC_{flux} = FE_{flux} \times Q_e$$

Avec,

BC_{flux} , le bilan carbone du flux (kg éq C),

FE_{flux} , le facteur d'émission du flux (kg éq C/t).

Q_e , la quantité de flux entrant par an.

7) Le bilan carbone du composant :

$$BC_{composant} = \frac{Pd_c \times FE_{composant} \times f_{fabrication}}{DV}$$

Avec,

$BC_{\text{composant}}$, le bilan carbone du composant (kg éq C),

Pd_c , poids du composant (t),

$FE_{\text{composant}}$, le facteur d'émission du composant (kg éq C/t),

$f_{\text{fabrication}}$, le facteur de fabrication du composant.

Lorsque les données concernant le facteur d'émissions n'étaient pas disponibles, nous avons estimés ce facteur en se basant sur sa composition. En effet, les composants identifiés (grappin, turbine, alternateur, générateur, trémie, camions de collecte...) sont principalement composés de métaux de types acier à 80%. A ce titre, nous proposons une composition moyenne pour chacun des composants, qui nous a permis d'estimer un facteur d'émission de 900 kg éq C/t.

A ce facteur d'émission, nous ajoutons un facteur de fabrication traduisant la complexité de la création du composant. Plus la fabrication du composant est complexe, plus le facteur de production est élevé. A titre d'exemple, nous considérons le camion de collecte comme étant le composant le plus sophistiqué. De ce fait, nous multiplions le facteur d'émission par un facteur de fabrication de 1,5, à l'inverse, un facteur de fabrication de 1,05 est attribué pour la trémie.

Dans le cas, de moyens de transport de type camions de collecte, bateau et avion, nous ramenons le facteur d'émission à une unité de distance : le kilomètre. En effet, cette donnée étant plus pertinente pour l'évolution des émissions dues au transport. La formule est la suivante :

$$BC_{MT} = \frac{Pd_c \times FE_{\text{composant}} \times f_{\text{fabrication}} \times km_{an}}{DV}$$

Avec,

BC_{MT} , le bilan carbone du moyen de transport (kg éq C),

km_{an} , nombre de kilomètres parcouru par le composant par an.

8) Le bilan carbone de l'énergie utilisée :

$$BC_{\text{énergie}} = FE_{\text{énergie}} \times C_e$$

Avec,

$BC_{\text{énergie}}$, le bilan carbone de l'énergie (kg éq C),

$FE_{\text{énergie}}$, le facteur d'émission de l'énergie (kg éq C/t).

9) Le bilan carbone total du composant :

$$BC_{\text{total}} = BC_{\text{flux}} + BC_{\text{composant}} + BC_{\text{énergie}} + BC_{\text{émissions}}$$

Ces calculs sont effectués pour chacun des composants et par automatisation des résultats les mêmes données sont synthétisées pour les échelles de niveaux supérieurs.

Comme présenté dans le paragraphe précédent, une fois l'acquisition de données réalisée au niveau des composants, des résultats synthétiques des niveaux

supérieurs sont proposés. Les calculs alors réalisés sont de simples additions des valeurs calculées précédemment pour les composants. Afin d'illustrer ces calculs, nous présentons la méthode pour l'estimation du bilan carbone. Ces formulations s'effectuent comme suit :

$$\begin{aligned}BC_{SGO} &= \sum BC_k \\BC_k &= \sum BC_j \\BC_j &= \sum BC_i \\BC_i &= BC_{total}\end{aligned}$$

Avec

i , les composants,
 j , les Opérations Unitaires,
 k , les Unités Fonctionnelles,
 SGO , la filière de traitement.

Les calculs pour les autres paramètres s'effectuent de la même façon.

Maintenant que la caractérisation a été réalisée, il est nécessaire d'explicitier les pages de présentation des résultats sous forme graphique.

III.6.2 Présentation des résultats au travers des sorties graphiques

Les pages de présentation des graphiques sont disponibles pour les Opérations Unitaire, les Unités Fonctionnelles et la filière de traitement. A ce titre toutes les sorties graphiques sont construites de la même façon. Elles se composent d'onglet comme pour les étapes d'acquisition de données permettant de présenter pour un niveau d'observation les résultats pour l'analyse des flux, des paramètres économiques et des paramètres environnementaux.

Nous présentons les sorties graphiques pour l'ensemble du système global d'observation, pour l'Unité Fonctionnelle d'incinération et de l'Opération Unitaire d'alimentation. Nous présentons les sorties graphiques pour la consommation et la production d'énergie, le bilan carbone et les coûts. Il est à noter que les coûts sont présentés uniquement pour le SGO afin de décrire la tendance de chacune des UF. L'information portant sur les coûts à une échelle inférieure (OU) ne nous semblait pas nécessaire.

Pour ce faire nous commençons notre navigation à l'échelle des composants puisque c'est à ce niveau que sont réalisées les acquisitions de données. Une fois les acquisitions de données effectuées à ce niveau, nous observerons les sorties graphiques en remontant dans la navigation aux niveaux supérieurs jusqu'au Système Global d'Observation. Parallèlement et comme pour précédemment, un tableau synthétique des données est présenté pour chacun de ces niveaux.

Nous avons également voulu différencier les sorties graphiques en proposant un aperçu final différents selon les paramètres considérés. L'analyse des flux propose respectivement pour la production et la consommation énergétique, un histogramme vertical à barre unique de couleur rouge et rose. Les paramètres environnementaux sont considérés selon un histogramme à barre unique vertical selon un dégradé de bleu selon les niveaux d'observation et les paramètres économiques selon un histogramme double horizontal de couleur rouge pour les coûts d'amortissement et bleu pour les coûts des opérateurs.

Les résultats de l'analyse des flux concernent la production et la consommation d'énergie (kWh/an). Dans le cas de l'observation d'une Opération Unitaire, nous aurons le détail des données pour chacun des composants. Et à l'inverse lorsque nous sommes à l'échelle de la Filière de Traitement, les données synthétisées des différentes UF composant la filière seront présentées. Les Figure 82, Figure 83, Figure 84, présentent les tendances obtenues pour la production et la consommation d'énergie. Nous pouvons à ce niveau observer que les principales UF consommatrices sont la collecte et le traitement des produits induits. Et concernant la production se sont les UF de traitement des déchets avec une production de vapeur et de traitement des produits induits avec une production d'électricité. Au niveau du SGO, le principal poste de consommation est la collecte et pour la production il s'agit de l'UF des produits induits. Pour l'UF de combustion, la tendance est vers le poste de consommation est d'alimentation du four puisque composée de plusieurs composants fonctionnant 24h/24h. Et pour la production d'énergie, il s'agit l'OU de combustion puisque c'est à cet endroit que s'effectue la production de vapeur. Et enfin à l'échelle des composants, il n'y a aucune production d'énergie d'énergie d'où l'absence de courbes et pour la consommation énergétique, c'est le composant grappin qui est le plus consommateur en énergie.

Les résultats des paramètres environnementaux concernent le Bilan Carbone des flux, des composants, et de l'énergie utilisée. Ici, nous illustrons les bilans carbone des composants pour le SGO, l'UF de combustion et l'OU d'alimentation du four (Figure 85, Figure 86, Figure 87). Au niveau du SGO, ce sont les UF de collecte et de traitement des déchets primaires qui émettent le plus. Au niveau de l'UF de combustion, les émissions sont principalement localisées au niveau de l'opération unitaire de combustion. Et pour l'OU d'alimentation, la fosse est la plus émettrice. Cette observation est pertinente au vu de la quantité de matières notamment de béton nécessaire à sa mise en place.

Les résultats des paramètres économiques sont présentés de manière à permettre une comparaison des valeurs entre les coûts d'amortissement et liés aux opérateurs (Figure 88). La tendance des courbes pour les coûts est une prédominance des coûts liés à la collecte, il s'agit là, de la principale dépense au niveau du SGO.

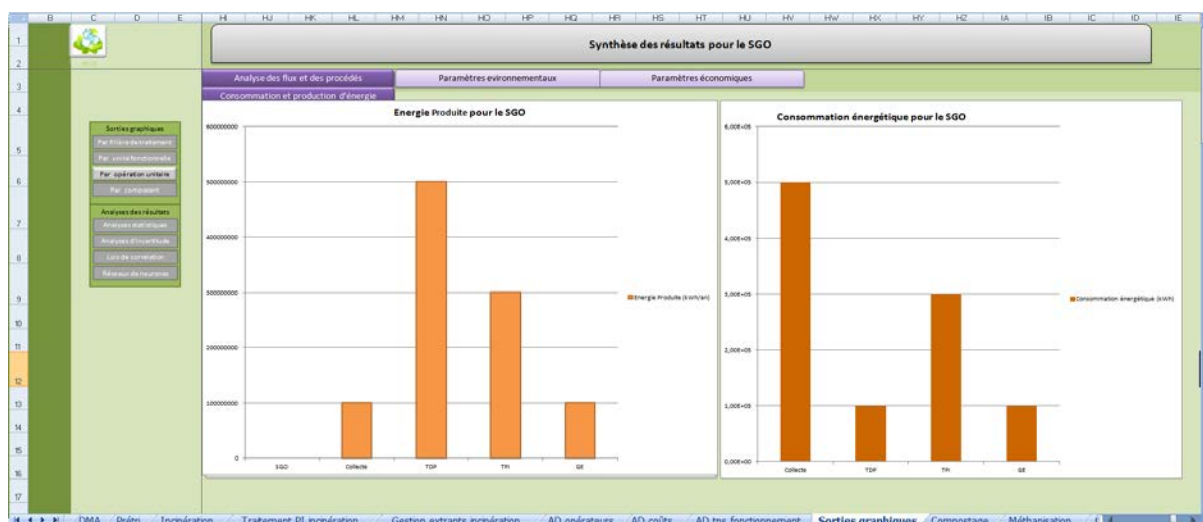


Figure 82 : Présentation des sorties graphiques pour la consommation et la production énergétique pour le SGO

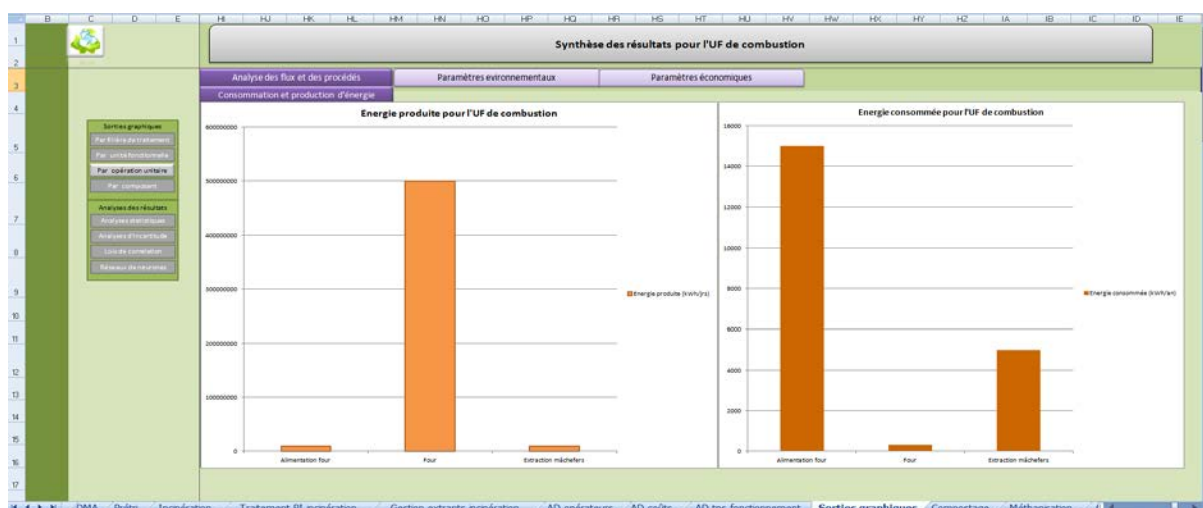


Figure 83 : Présentation des sorties graphiques pour la consommation et la production pour l'UF de combustion

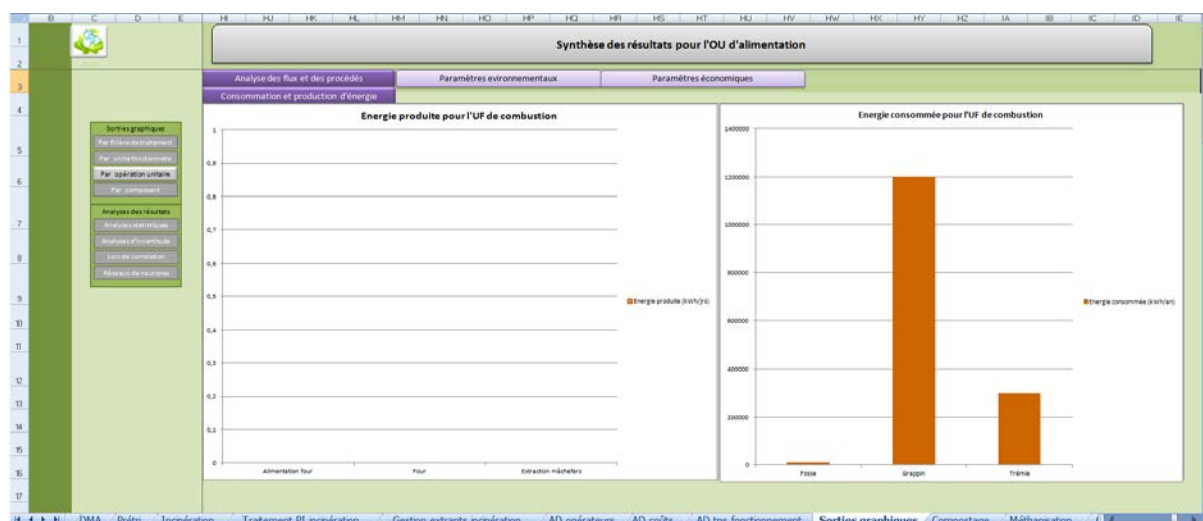


Figure 84 : Présentation des sorties graphiques de la consommation et la production pour l'OU d'alimentation du four

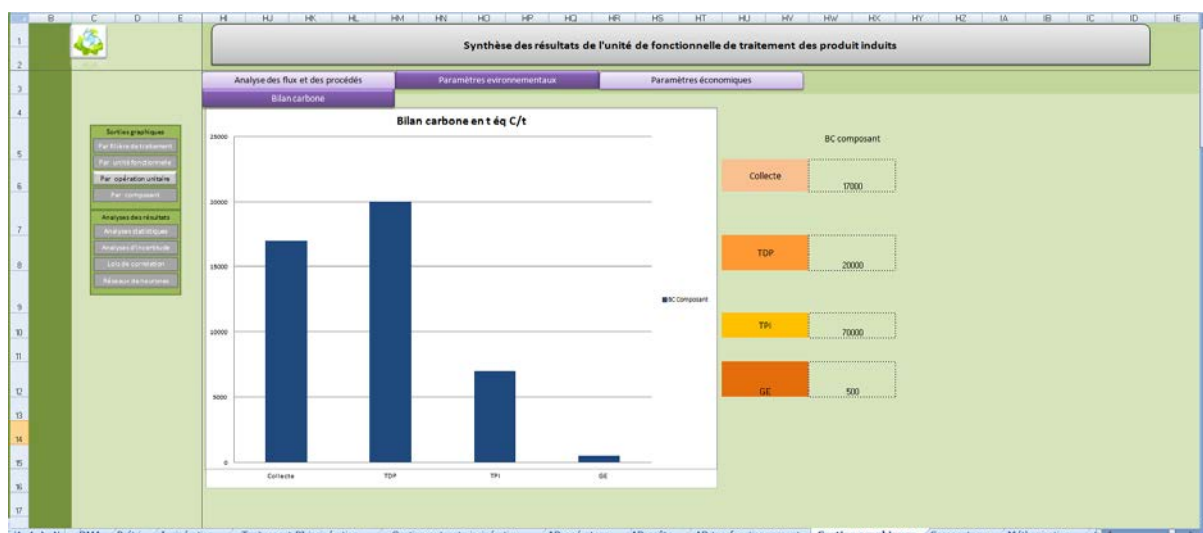


Figure 85 : Présentation des sorties graphiques du bilan carbone pour le SGO

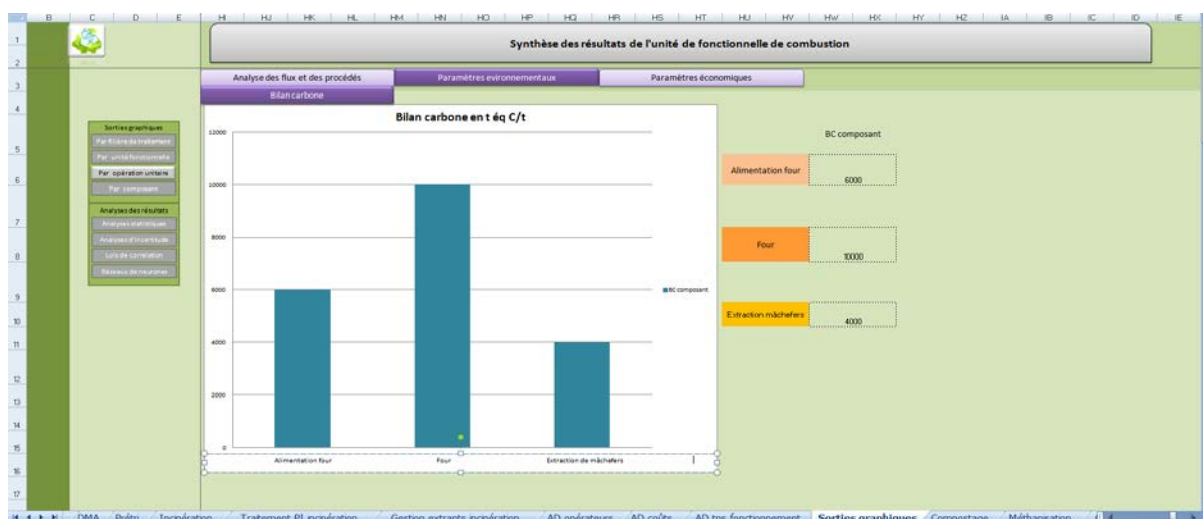


Figure 86 : Présentation des sorties graphiques du bilan carbone pour l'UF de combustion

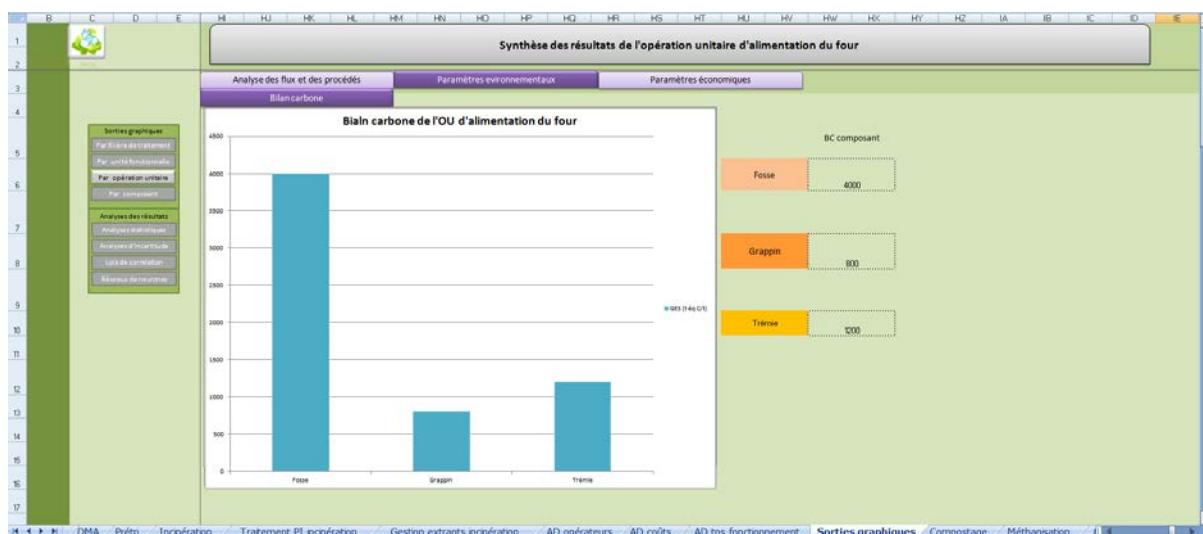


Figure 87 : Présentation des sorties graphiques de bilan carbone pour les OU d'alimentation du four

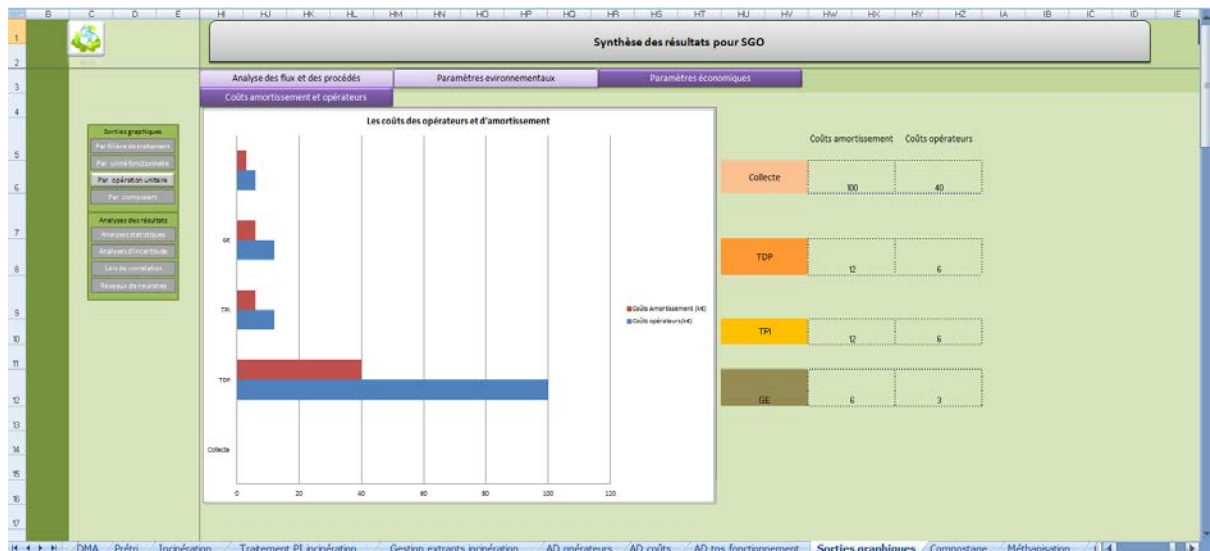


Figure 88 : Présentation des sorties graphiques des coûts d'opérateurs et d'amortissement pour le SGO

III.7 Exemple de navigation et d'acquisition de données au travers de l'UF d'incinération

La navigation pour l'acquisition de données début dès la page d'accueil de l'UF d'incinération. Mais afin de cerner au mieux l'outil de simulation, il est préférable tout d'abord de présenter l'étape de collecte, puis le cheminement des déchets jusqu'à l'arrivée en UF d'incinération.

A l'entrée de l'UF de collecte, nous apercevons une page d'accueil composée de plusieurs éléments. Cette page peut se scinder en 4 parties distinctes comme présentées dans la Figure 89. La partie 1 en haut à droite se compose d'une série de flèches noires. Systématiquement, nous aurons sur les pages d'accueil des UF, ces flèches noires permettant de cibler les différentes acquisitions de données à effectuer. Une flèche tout en haut pour poursuivre le cheminement aux UF suivantes est signalisée par une double flèche expliquant symboliquement qu'il est possible de naviguer d'une UF à une autre selon un axe horizontale. Suivie d'une flèche noire symbolisée par une flèche descendante indiquant qu'il s'agit de l'acquisition de données du composant (à un niveau inférieure). Sachant que le même principe est observé pour le menu du haut.

En effet, la partie 2 en haut au centre constitue le cœur de la navigation, c'est par son biais que le passage directe d'un niveau à un autre ou d'une UF à une autre est possible par simple clic sur le bouton désiré. De plus, l'apparition de boutons colorés, nous permet de nous situer en sein de l'outil ainsi que le cheminement parcouru pour y arriver. Dans cet exemple, nous nous situons au sein de l'Opération Unitaire de collecte et de transport, qui elle-même se situe dans l'UF de collecte et de transport, issue de la filière de traitement des déchets ménagers par incinération.

La partie 3 à gauche, nous indique le choix des déchets à traiter ici les DMA et le mode de traitement considéré ici l'incinération. Et enfin, la partie 4 qui constitue le cœur l'acquisition de données. Sur les pages d'accueil des UF, on aura sur le côté

Partie 1- Chapitre 3 : Conception et réalisation d'un outil de simulation de gestion et de traitement des déchets

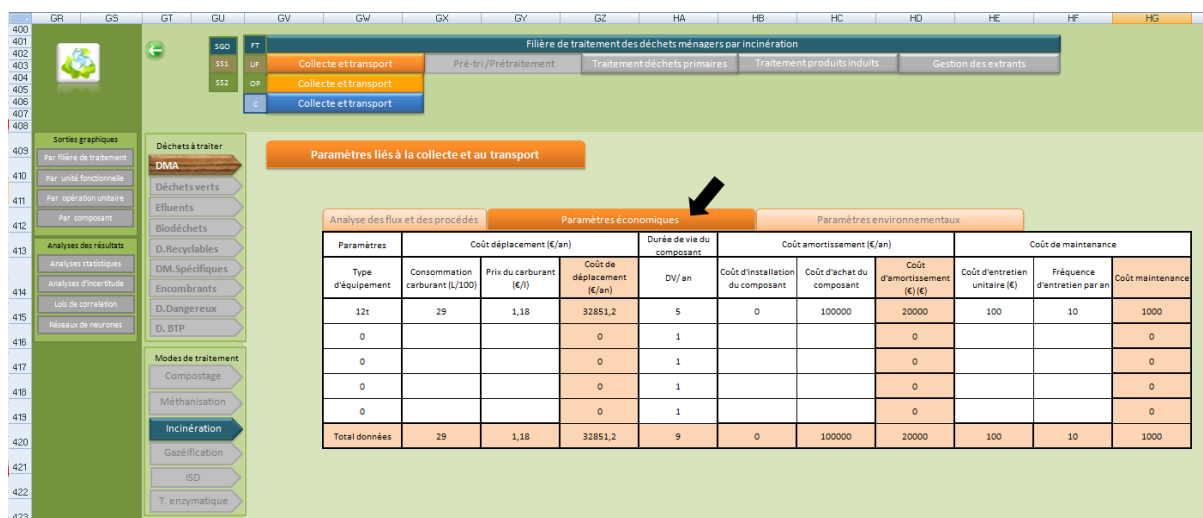


Figure 91 : Acquisition de données des paramètres économiques au sein de l'OU de collecte

Après, les paramètres économiques, il est nécessaire d'entrée les paramètres environnementaux liés aux émissions de GES. Dans le cas de la collecte, deux types d'émissions sont considérées, celles liées aux composants et celle liées à l'énergie consommée (cf. exemple de sorties graphique).

Maintenant que nous avons entrée l'ensemble des données à l'échelle du composant, nous devons renseigner les données pour les opérateurs. Pour cela, nous cliquons sur la flèche verte en haut à gauche afin de revenir en arrière, c'est-à-dire sur la page d'accueil de l'UF, puis nous cliquons sur la flèche noire acquisition de données opérateurs. Comme précédemment deux volets sont considérés le volet flux liés aux opérateurs et le volet économique (Figure 92 et Figure 93).

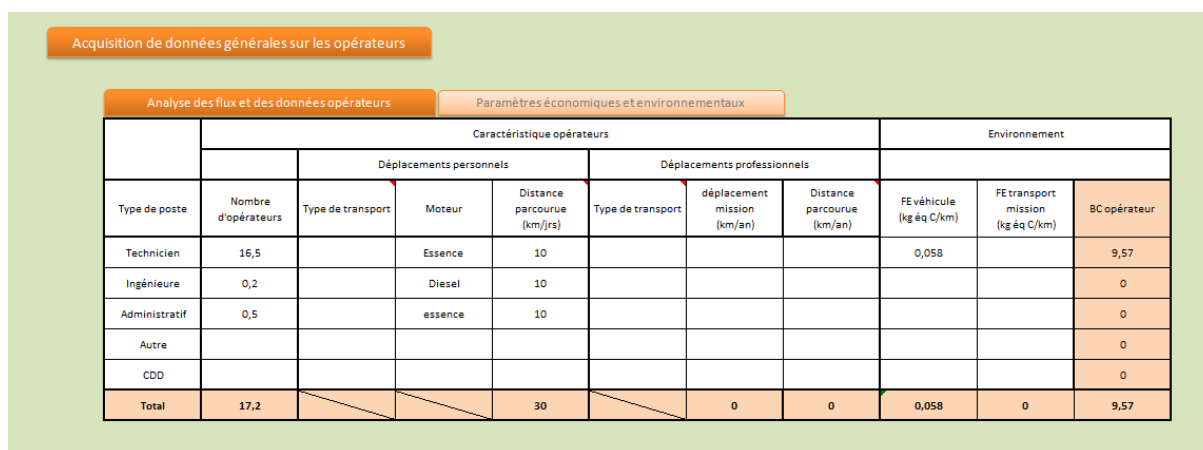


Figure 92 : Acquisition de données de l'UF de collecte pour les flux liés aux opérateurs

Pour revenir à la page d'accueil, il suffit de cliquer sur la petite flèche verte en haut droite.

Acquisition de données générales sur les opérateurs

Analyse des flux et des données opérateurs				Paramètres économiques et environnementaux			
	Coûts opérateurs						
Type de poste	Nombre d'heure ouvrées (hrs/irs)	Nombre d'heure ouvrées (hrs/ms)	Nombre d'heure ouvrées (hrs/an)	Coût horaire (€/hrs)	Coût opérateur (€/irs)	Coût opérateur (€/ims)	Coût opérateur (€/ian)
Technicien	7	140	1540	12	84	1680	18480
Ingénieure	8	160	1760	40	320	6400	70400
Administratif	8	160	1760	14	112	2240	24640
Autre					0	0	0
CDD					0	0	0
Total	7,67	460	5060	66	516	10320	113520

Figure 93 : Acquisition de données de l'UF de collecte des paramètres économiques liés aux opérateurs

De retour, sur la page d'accueil, il est d'or et déjà possible de visualiser la synthèse des résultats entrée ainsi que les sorties graphiques liées à l'UF de collecte en cliquant sur le bouton « par composants » du menu de gauche comme présenté ci-dessus.

Une fois, l'acquisition de données réalisée pour l'UF de collecte, nous pouvons poursuivre vers l'UF de traitement des déchets primaires en cliquant sur la flèche noire avec le symbole de flèches horizontales. L'outil, nous propose une page de l'état d'avancement afin de visualiser la progression au sein de l'outil avant d'arriver sur le page d'accueil de l'UF de traitement des déchets où le même processus de navigation et d'acquisition recommence (Figure 94).

Puis, nous arrivons sur la page d'accueil de l'UF comme précédemment à partir de laquelle, il est possible de réaliser les acquisitions de données pour les opérateurs et pour les composants. Nous proposons de décrire le processus d'acquisition de données pour le four.

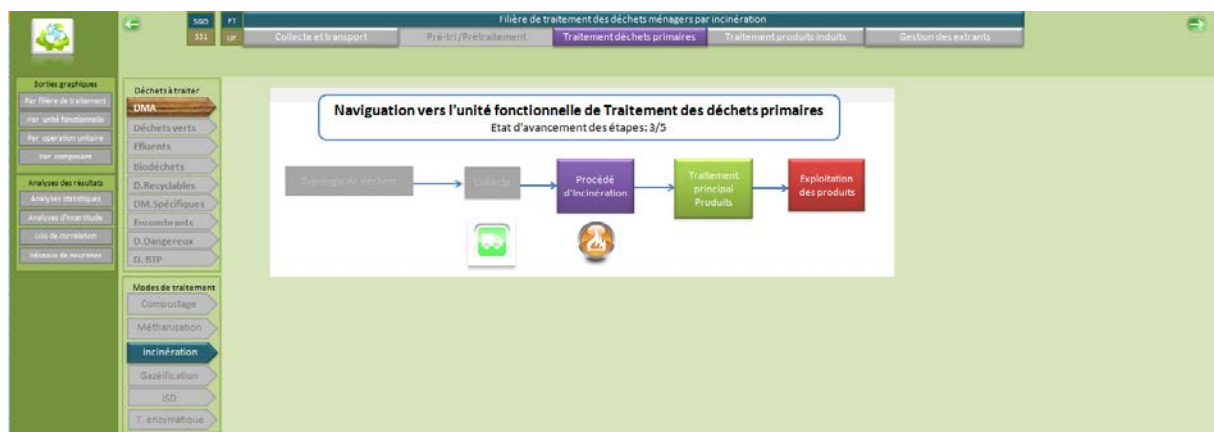


Figure 94 : Etape de navigation intermédiaire entre deux UF : Etat d'avancement

La Figure 95 synthétise toute la démarche de navigation sous forme d'organigramme.



Figure 95 : Organigramme synthétique de la navigation au sein de l'outil illustré par l'UF d'incinération, l'OU de combustion et l'acquisition de données au niveau du four

IV. Conclusion

La mise en œuvre d'un outil de description et de simulation des filières de gestion et de traitement des déchets est une étape clé dans la poursuite de mes travaux de recherche.

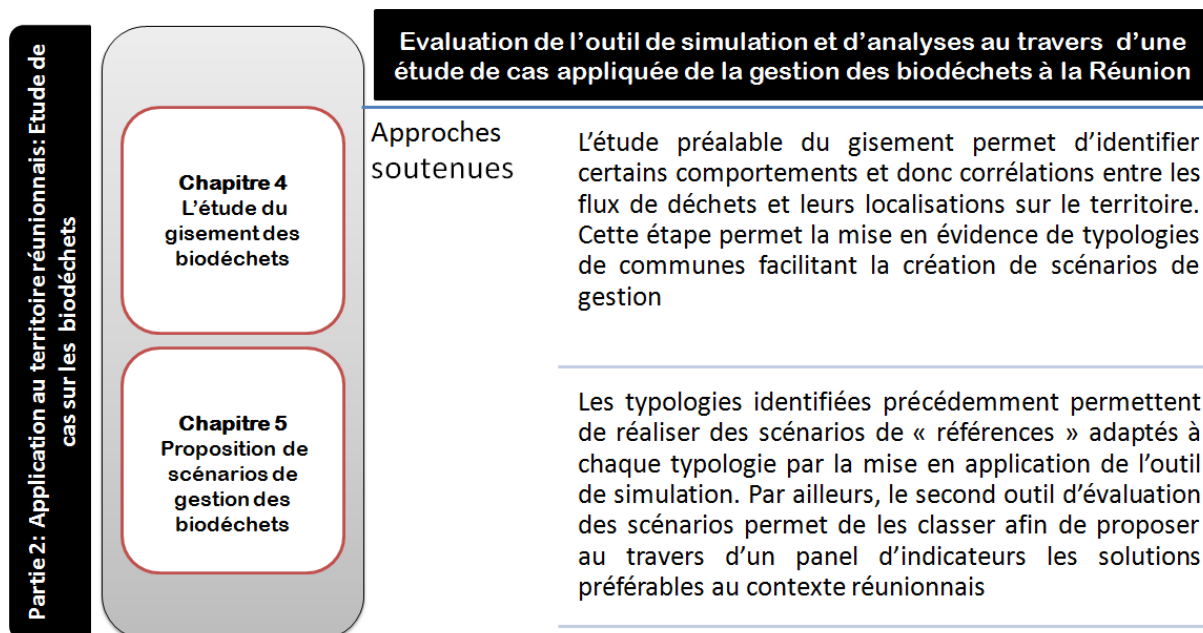
Il s'agit de développer une approche descriptive qui nous permet de présenter de manière intelligible toutes les entités qui composent le système de traitement des déchets ainsi que les flux de matière et d'énergie qui interfèrent avec les systèmes observés. Nous commençons par une phase d'identification où toutes les entités observées (flux et systèmes) sont clairement définies, nous poursuivons la description par une phase de caractérisation où nous définissons et renseignons tous les paramètres d'observation des flux et des systèmes.

La conception de l'outil, nécessite donc une connaissance précise des éléments constituant chacun des niveaux d'observation étudiés. Cette observation du système par l'observation des flux, nous a permis de mettre en évidence les phases de traitement autour des étapes de stockage, de transport et de transformation. C'est notamment au travers de ces indices qu'il nous a été possible d'identifier les paramètres de gestion à considérer afin de répondre à nos problématiques de coûts et d'environnement.

Nous avons pu observer et analyser le système étudié à travers les niveaux d'observation (filière de traitement ou système globale d'observation, phase de gestion ou Unités Fonctionnelles, Opérations Unitaires et composants), autour des flux convectés, des paramètres structurels, des paramètres fonctionnels et de gestion considérés pour la construction de l'outil de simulation. A ce stade, l'outil permet une acquisition de données détaillées à toutes les phases de gestion afin d'établir un certain nombre de scénarii de gestion des déchets.

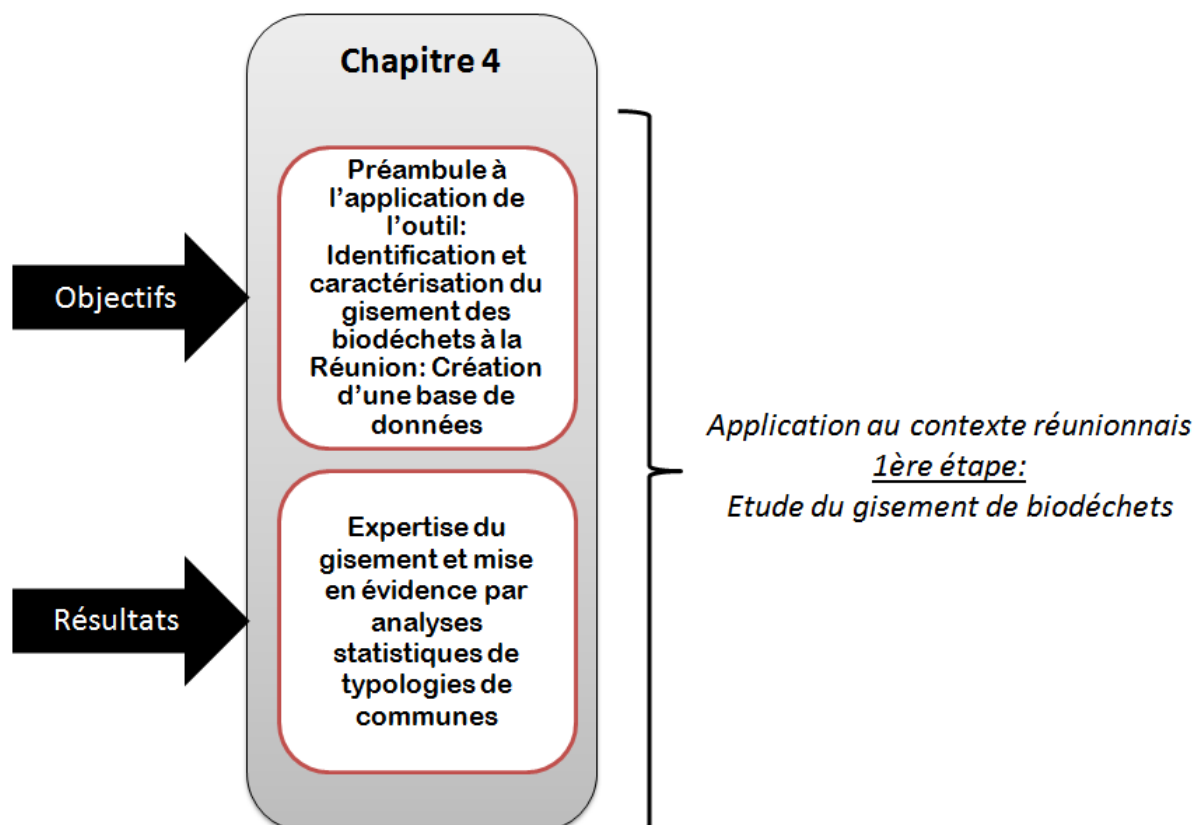
Partie 2

Application au territoire réunionnais : Etude de cas des biodéchets



Chapitre 4

L'étude du gisement des biodéchets



Sommaire

I. Introduction	250
II. Quantification du gisement de biodéchets	252
II.1 Création de la base de données des biodéchets.....	253
II.1.1 Caractérisation des biodéchets et des huiles alimentaires usagées issus de la restauration collective	256
II.1.1.1 Biodéchets de la restauration collective	256
II.1.1.2 Les HAU issus de la restauration collective	258
II.1.2 Caractérisation des biodéchets présents dans les ordures ménagères	259
II.1.2.1 La FFOM et des déchets verts	259
II.1.2.2 Les boues de STEP	260
II.1.2.3 Les biodéchets des marchés forains	260
II.1.3 Caractérisation des biodéchets agricoles	261
II.1.3.1 Les effluents agricoles	261
II.1.3.2 Les résidus de paille de canne à sucre	262
II.1.4 Caractérisation des biodéchets industriels	263
II.2 Potentiels de production en déchets organiques à la Réunion.....	268
II.2.1 Les tonnages obtenus pour les biodéchets issus des collectivités et des ménages	268
II.2.2 Les tonnages obtenus pour les effluents d'élevages	270
II.2.3 Les tonnages obtenus pour les biodéchets industriels	272
II.2.4 Conclusion générale sur les gisements de biodéchets à la Réunion ..	274
III. Analyses statistiques et interprétations de la base de données .	277
III.1 Analyse univariée	280
III.2 Analyses bivariées	284
III.2.1 Lien entre les boues urbaines et les effluents agricoles.....	284
III.2.2 Lien entre les boues et la FFOM	284
III.3 Régression linéaire Multiple.....	290
III.3.1 Corrélations des boues à l'ensemble des variables.....	290
III.3.2 Corrélation de la FFOM à l'ensemble des variables	291
III.3.3 Corrélation des biodéchets IAA à l'ensemble des variables.....	291
III.4 ANOVA	294
III.5 Analyse en Composantes Principales (ACP).....	295
III.5.1 Choisir le nombre d'axes	296

III.5.2	Analyse des résultats	297
III.5.2.1	Observations des individus	297
III.5.2.2	Observation des variables	298
III.5.3	Résultats Numériques	301
IV.	Conclusion	303

I. Introduction

L'étude du gisement des biodéchets constitue la première étape de notre partie applicative. Ce chapitre s'articule autour de deux points :

- 1) Le premier expose la méthodologie utilisée pour quantifier le gisement de biodéchets et les données chiffrées obtenues ;
- 2) Le deuxième propose une série d'analyses statistiques permettant l'interprétation des données précédentes.

Dans ce chapitre sont donc exposées la démarche de création d'une base de données sur les biodéchets et l'analyse de ces données par analyses statistiques (Figure 96).

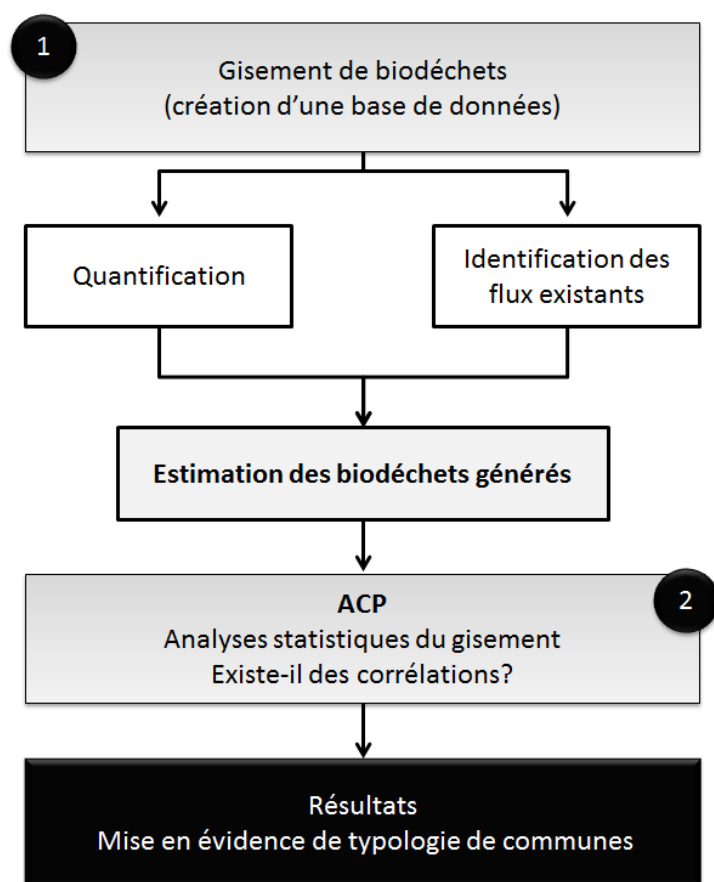


Figure 96: Méthodologie générale d'estimation des biodéchets générés et de l'analyse des données (source : HATIK, 2015)

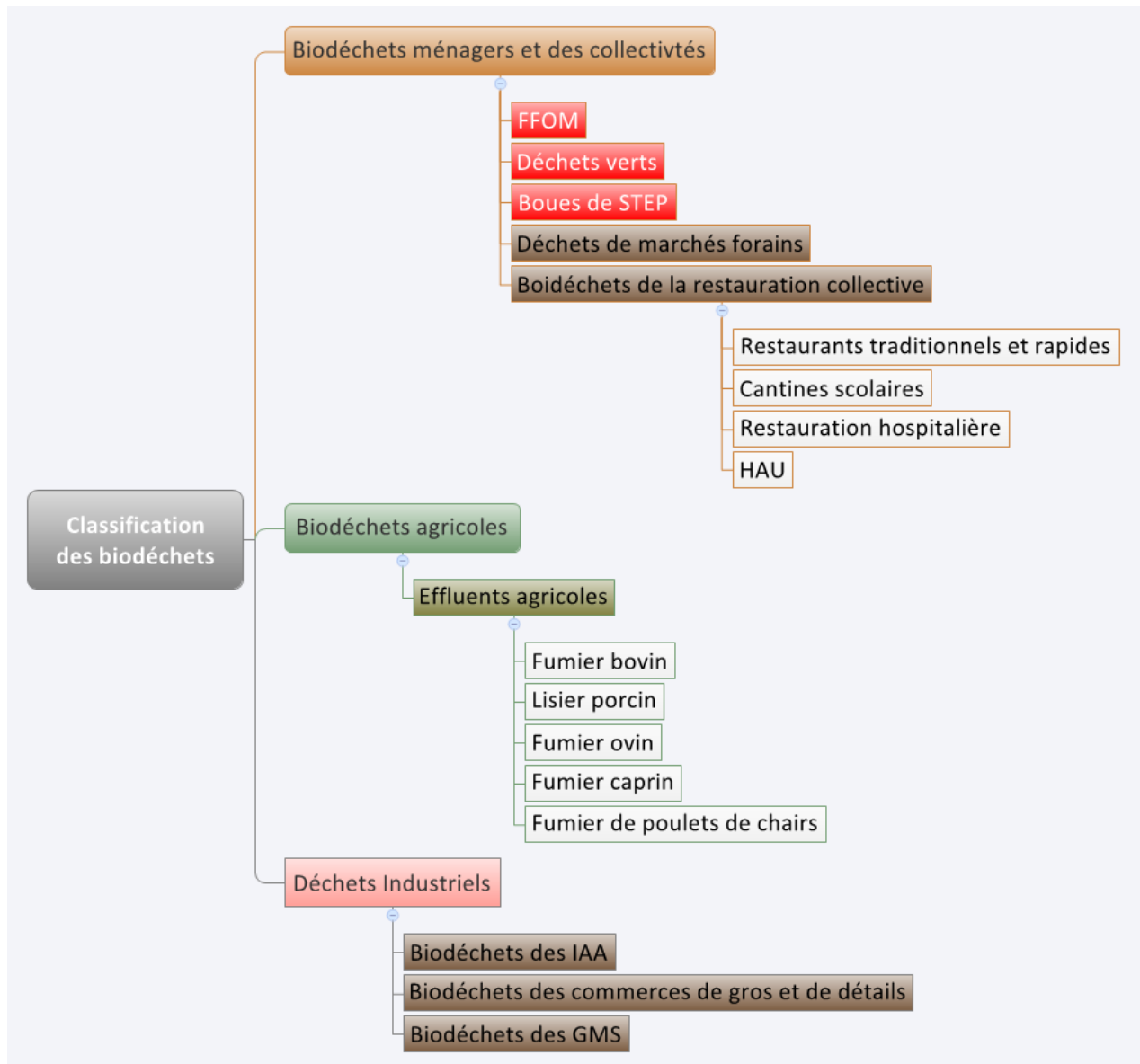


Figure 97 : Présentation de la classification des biodéchets appliquée à l'étude de cas (source : HATIK, 2015)

Dans un premier point, il sera présenté le gisement biodéchets sur le territoire réunionnais. Pour ce faire, nous nous sommes inspirés des méthodes appliquées au sein du projet « Biodecol2 »¹⁰. Ce projet a pour but de déterminer la production de biogaz issus de plusieurs sources de déchets fermentescibles par un procédé de co-méthanisation pour la Région Bretonne. Il vise à proposer un certain nombre d'outils mais également une méthodologie d'inventaire des substrats organiques adaptée à l'échelle locale basée sur les travaux de Tretyakov, 2008. C'est sur cette base que nous avons étoffé notre méthodologie par **l'adjonction** de ratios de production. Ainsi, nous nous sommes appuyés sur leurs expériences **en les adaptant** à notre contexte insulaire et à toutes les sources de déchets fermentescibles méthanisables ou non et donc à toutes unités de traitement pouvant valoriser les déchets organiques.

Dans un deuxième point, un certain nombre d'analyses statistiques ont été mises en œuvre dont l'essentiel est l'Analyse en Composante Principale (ACP). Ces statistiques, nous permettent d'effectuer une typologie des communes par rapport à la composition des déchets organiques présents. Nous pouvons à l'issue de ce classement identifier les communes ayant le même profil et qui sont donc susceptibles d'être gérées de la même manière. De ce fait, les communes d'une même typologie qui présentent donc le même profil pourront bénéficier d'un même scénario de gestion.

Ce chapitre consiste donc à identifier le potentiel de production en biodéchets à l'île de la Réunion, ainsi que la mise en évidence de typologies au sein des communes favorisant leur regroupement pour la mise en place de scénarios de gestion. Une fois, les gisements, leur répartition et leur regroupement connus, nous pouvons identifier les zones potentiellement aptes à accueillir de futures installations de traitement des déchets et les scénarios associés (Cf. chapitre 5). Ce chapitre a donc pour objectif de lisser le cadre préalable aux scénarios de gestion.

II. Quantification du gisement de biodéchets

Conformément à la réglementation, la gestion des biodéchets est de la responsabilité des conseils généraux. Ils sont gérés conformément aux orientations préconisées par le PPDGDND. Ce plan précise la liste des déchets considérés au niveau local. Afin d'être le plus juste possible, nous avons sélectionné dans cette liste, les déchets que nous souhaitons considérer dans notre étude. Les déchets pris en compte ici sont donc les suivants :

- Ordures ménagères(OM) et plus précisément la fraction fermentescible des ordures ménagères (FFOM),
- Déchets verts (DV),
- Huiles alimentaires usagées (HAU),

¹⁰ production de BIOgaz par co-digestion des DEchets agriCOLes et issus des COLlectivités porté par l'IRSTEA de Rennes et financé par l'Agence Nationale de Recherche (ANR). Biodecol2 a été réalisé pour permettre de réduire les émissions de gaz à effet de serre dues aux déchets organiques mais également pour répondre aux enjeux énergétiques du moment promouvant ainsi le développement de la méthanisation, qu'elle soit à l'échelle « de la ferme », centralisée « agricole ou industrielle ».

- Déchets de marchés forains,
- Boues de STEP,
- Effluents agricoles.

La classification des biodéchets appliquée à l'étude de cas est présentée dans la Figure 97. Les données qui étaient déjà disponibles sur le territoire réunionnais sont signalées en rouge (FFOM, Déchets verts et boues de STEP). Les autres données qui n'étaient pas disponibles ou nécessitaient d'être réévaluées sont marquées en marron à savoir les biodéchets industriels, les biodéchets de la restauration collective et des marchés forains. Afin de quantifier ces gisements, nous avons utilisés des ratios de production spécifiques à chaque flux issus d'enquêtes nationales. Et enfin les effluents d'élevages (en vert) ont également nécessité une méthode de quantification particulière basée sur l'estimation de la production d'effluents par têtes et par espèces. Au final, deux méthodes de quantification différentes ont donc du être établies pour estimer le gisement de biodéchets actuel.

Pour ce faire, une investigation importante a été réalisée pour l'identification des données de base comme les ratios de production de biodéchets et d'effluents spécifiques à chaque flux considérés ainsi que tous les caractéristiques liés aux biodéchets lui-même (% de matière organique, % de matières sèche, potentiel méthanogène, PCI et autres données disponibles). Mais aussi pour l'identification des sites de production à savoir le recensement de la totalité des établissements scolaires, des restaurants traditionnels et rapides, des commerces de gros et de détails, des grandes et moyennes surfaces, des industries agro-alimentaires, des marchés forains, des bâtiments hospitaliers et des différents cheptels existants. Ces investigations ont données lieux à la mise en place d'enquêtes téléphoniques et de visites sur sites enfin de rassembler ces informations de manières très précises.

Les méthodes et les données utilisées pour constituer la base de données sont donc présentées et décrites en première partie de ce chapitre pour ensuite être analysées et interprétées par analyses statistiques dans une deuxième partie. Les données recensées sont exprimées en tonnes de matières organiques par an, par flux de déchets et par communes selon une matrice à 15 variables représentant les flux (colonne) et de 24 individus représentant les communes (lignes). La matrice complète de la base de données est présentée en annexe 13. Une fois, la matrice réalisée tout un travail d'analyse spatiale a également été fait en plus des analyses statistiques afin de rendre compte des zones très productrices en déchets des zones moins productrices.

II.1 Création de la base de données des biodéchets

Pour quantifier la production de biodéchets à la Réunion, plusieurs méthodes ont été abordées selon les gisements concernés. En effet, lorsque cela était possible, nous nous sommes appuyés sur les données chiffrées existantes, c'est le cas pour les boues de station d'épuration (STEP). Lorsque les données chiffrées n'étaient pas disponibles, nous nous sommes inspirées des études menées au niveau national à partir de ratio de production. Ces ratios de production sont déterminés lors d'études de pesées sur un territoire donné. Ils constituent donc une moyenne de production exprimée soit par repas pour la restauration collective, soit par effectif

pour les commerces alimentaires et les IAA ou encore par surface pour les GMS¹¹. Concernant le gisement agricole, nous avons utilisé une toute autre méthode qui vise à déterminer la production d'effluents à partir d'une estimation de production d'effluents par tête et par espèce considérées. Afin que la lecture se fasse simplement, nous avons organisé la démarche en trois points distincts regroupant les flux de biodéchets par origines, à savoir : ménagère, agricole et industrielle.

Les Tableau 25 et Tableau 26 présentent toutes les formulations et données utilisées pour l'estimation du gisement général de déchets organiques à la Réunion. Les paragraphes suivants précisent les démarches utilisées et décrivent les méthodes de calculs.

Tableau 25 : Synthèse des calculs par flux de déchets

		Type de flux	Formulation
Bilan matière (tonnes)	Déchets des collectivités	Restauration collective	$Q_{ty} \text{ (tonne/an)} \geq \sum_{i=1}^n Q_{iy} \text{ (tonne/an)}$ $Q_{iy} \text{ (t/an)} = Nb_R \times R_{DO}$
		HAU	$Q_{ty} \text{ (tonne/an)} \geq \sum_{i=1}^n Q_{iy} \text{ (tonne/an)}$ $Q_{iy} \text{ (t/an)} = \frac{Nb_R \times R_{HAU} \text{ (m}^3\text{/an)}}{g_{repas} \text{ (t)}}$
		Marché forain	$Q_{ty} \text{ (tonne/an)} \geq \sum_{i=1}^n Q_{iy} \text{ (tonne/an)}$ $Q_{iy} \text{ (t/an)} = Nb_{Ex} \times R_{DIB} \times \%_{DO}$
	Déchets agricoles	Effluents agricoles	$Q_{ty} \text{ (tonne/an)} \geq \sum_{i=1}^n Q_{pay} \text{ (tonne/an)}$ $Q_{pay} \text{ (t/an)} = Q_{pai} \text{ (t/tête/an)} \times P_{ay} \text{ (nombre tête/an)} \times T_{bat} \text{ (\%)}$
	Déchets industriels	IAA / Commerces alimentaires	$Q_{ty} \geq \sum_{i=1}^n Q_{iy}$ $Q_{iy} = ES \times R_{DO}$
		GMS	$Q_{ty} \geq \sum_{i=1}^n Q_{iy}$ $Q_{iy} = S \times R_{DIB} \times \%_{DO}$

¹¹ Ces ratios sont de deux types, soit ils précisent directement le pourcentage de déchets organiques présents dans le flux considéré, soit ils précisent d'abord le pourcentage de DIB puis le pourcentage de déchets organiques au sein des DIB. Ces ratios prennent en compte les papiers et les cartons et excluent les déchets carnés. Ces déchets sont déjà traités séparément via une filière de valorisation (Sica des Sables).

Tableau 26 : Synthèse des références utilisées

	Types de flux		Jours ouverts et services par jours	Ratio (g/repas)	Références	%MO	Références	Fichier source	Année de référence		
Déchets ménagers et de collectivités	Restauration collective	Restauration rapide	365 / 2	241	ADEME (2013)	67,8	Boret, 2011	Enquête auprès des services concernés (2012)	2010		
		Restauration traditionnelle	313 / 2	185				Enquête auprès des services concernés (2012)	2010		
		Restauration écoles primaires	144 / 1	185				Enquête auprès des services concernés (2012)	2012		
		Restauration collèges et lycées	180 / 1	280				Enquête auprès des services concernés (2012)	2012		
		Restauration universitaire	205 / 2 (RT) 246 / 2 (RR)	315				Enquête auprès des services concernés (2012)	2012		
		Restauration hôtelière	329 / 2	500				Site de l'office du tourisme de la Réunion	2012		
		Restauration établissements de santé	365 / 2	185				a cartographie des établissements sanitaires, sociaux et médico-sociaux de la Réunion : les capacités installées et autorisées (2005)	2010		
		HAU restauration collective		30 ml (RT) 80ml (RR) 8 ml (autres RC)			35,5	Bioteau, T., Dabert, P. (2009). DIGES 2		2010/2012	
	Déchets ménagers et des collectivités	Marchés forains		20 kg/jrs/exposants	ADEME (2013)	67,8	Boret, 2011	Enquête auprès des services concernés (2012)	2012		
		Déchets verts		divers (kg/hab/an) (cf.tab)	SPED EPCI, 2012	50,43	MODECOM Réunion, 2008	Recensement population INSEE, 2010	2010		
FFOM			divers (kg/hab/an) (cf.tab)	SPED EPCI, 2012	9,3	MODECOM Réunion, 2008	Recensement population INSEE, 2010	2010			
Boues STEP solides					62,5 %MS/MO	Guide de la fertilisation organique à la Réunion (2007)	Office de l'eau de la Réunion, 2010	2010			
	Types de flux	Ratio de production effluents (t/an/tête)	Références	T _{dur} (%)	Références	%MO	Références	Fichier source	Année de référence		
Déchets agricoles	Fumier bovin	15	CORPEN (2009)	60	Biomasse Normandie (2002)	18	Guide de la fertilisation organique à la Réunion, 2007	Recensement agricole 2010	2010		
	Lisier porcin	15,4	P. Latimier et al. (1996)	100		3,5					
	Fumier caprin	1	CORPEN (2009)/T. Pelloquin (2010)	20		26,9					
	Fumier ovins	1,3	CORPEN (2009)/T. Pelloquin (2010)	20		22,3					
	Fiente de poulets de chair	150 kg/m²/an (pour 5 cycles de production/an)	CORPEN (2009) Référentiel avicole ile Réunion (2012)	100		46,9					
Déchets industriels	IAA	Code NAF	Désignation des activités	Ratios (t/salarié/an)	Références	%MO	Références	Fichier source	Année de référence		
		0311Z	PECHE EN MER	0,06						67,8	Boret, 2011
		0321Z	AQUACULTURE EN MER	0,06						67,8	Boret, 2011
		1011Z	TRANSFORMATION ET CONSERVATION DE LA VIANDE DE BOUCHERIE	0,03						16	Boret, 2011
		1012Z	TRANSFORMATION ET CONSERVATION DE LA VIANDE DE VOLAILLE	0,03						21	Boret, 2011
		1013A	PREPARATION INDUSTRIELLE DE PRODUITS A BASE DE VIANDE	1,36						35	Boret, 2011
		1020Z	TRANSFORMATION ET CONSERVATION DE LA VIANDE	0,06						16	Boret, 2011
		1031Z	TRANSFORMATION ET CONSERVATION DE LA VIANDE	1,51						8	Boret, 2011
		1032Z	PREPARATION DE JUS DE BOUILLON ET LEGUMES AUTRE	3,85						13	Boret, 2011
		1039A	TRANSFORMATION ET CONSERVATION DE LA VIANDE	1,51						11	Boret, 2011
		1039B	TRANSFORMATION ET CONSERVATION DE LA VIANDE	1,51						27	Boret, 2011
		1041B	FABRICATION D'HUILES ET GRAISSEES ANIMALES	0						67,8	Boret, 2011
		1051A	FABRICATION DE LAIT	0,07						67,8	Boret, 2011
		1051C	FABRICATION DE LAIT	0,07						56	Boret, 2011
		1052Z	FABRICATION DE GLACES ET SOUS-PRODUITS	0,2						67,8	Boret, 2011
		1061A	MELNRIE	1,02						84	Boret, 2011
		1061B	AUTRES ACTIVITES DU TRAVAIL DES GRAINS	0						84	Boret, 2011
		1071A	FABRICATION DE PATES ALIMENTAIRES	1,53						67,8	Boret, 2011
		1072Z	FABRICATION DE PATES ALIMENTAIRES	0,21						67,8	Boret, 2011
		1073Z	FABRICATION DE PATES ALIMENTAIRES	1,02						67,8	Boret, 2011
		1082Z	FABRICATION DE PATES ALIMENTAIRES	0,07						83	Boret, 2011
		1083Z	TRANSFORMATION DU PAIN ET PÂTISSERIE	0						67,8	Boret, 2011
		1084Z	FABRICATION DE PÂTISSERIE	0,07						67,8	Boret, 2011
		1085Z	CONDIMENTS ET SAUMONS	12,65						8	Boret, 2011
		1089Z	FABRICATION DE PLATS PREPARES	12,65						8	Boret, 2011
		1091Z	FABRICATION DE PRODUITS	0,9						67,8	Boret, 2011
		1092Z	FABRICATION DE PRODUITS	1,34						67,8	Boret, 2011
		1101Z	PRODUCTION DE VIN	0						16	Boret, 2011
		1102B	VINIFICATION	3,85						20	Boret, 2011
		1105Z	FABRICATION DE BIERE	0						20	Boret, 2011
		1107A	INDUSTRIE DES EAUX DE TABLE	0						67,8	Boret, 2011
		1107B	PRODUCTION DE BIÈRE	0						67,8	Boret, 2011
	1200Z	FABRICATION DE PRODUITS A BASE DE TABAC	0,07	67,8	Boret, 2011						
	Commerces alimentaires			0,35 t	Diagnostic Déchets Organiques, 2011	67,8	Boret, 2011	Fichiers consulaires CCIR, 2010	2010		
	GMS			17,94 kg/m² (Hypermarchés) 22,5 kg/m² (Supérettes) 21,03 kg/m² (Supermarchés)	ADEME (2013)	67,8	Boret, 2011	BPE INSEE, 2012	2012		

II.1.1 **Caractérisation des biodéchets et des huiles alimentaires usagées issus de la restauration collective**

II.1.1.1 *Biodéchets de la restauration collective*

La quantité annuelle de biodéchets (Q_{iy}) engendrés par un type de restauration (i), au cours d'une année de référence (y), est donnée en multipliant le nombre de repas (Nb_R) fournis à l'année par un ratio de production de biodéchets (R_{DO}) produits par repas ou par le ratio de production de DIB (R_{DIB}) puis par le taux de déchets organiques ($\%_{DO}$). La somme des gisements des i types de restauration représente la quantité totale de biodéchets (Q_{ty}) produits par l'ensemble des restaurations collectives considérées pour l'année y . Ces expressions sont données par les relations 1 et 2 :

$$Q_{ty} \text{ (tonne/an)} \geq \sum_{i=1}^n Q_{iy} \text{ (tonne/an)} \quad (1)$$

$$Q_{iy} \text{ (t/an)} = Nb_R \times R_{DO} \quad (2)$$

Ou

$$Q_{iy} \text{ (t/an)} = Nb_R \times R_{DIB} \times \%_{DO}$$

Le nombre de repas journalier est issu d'enquêtes téléphoniques. Les questionnaires sont présentés en annexe 14. Lorsque cette donnée n'était pas accessible, nous nous sommes basés sur la capacité d'accueil des infrastructures considérées ou encore sur le nombre d'effectif salarial. Une fois, le nombre de repas journalier déterminé, nous avons estimé le nombre de jours ouvrés dans l'année en fonction du type d'établissements pour obtenir le nombre de repas annuels.

Tableau 27 : Synthèse des données utilisées pour la quantification des gisements issus de la restauration collective

Types de restauration	Jours ouverts et services par jours	Ratios (gDO/repas)	Références des ratios	Références des nombre de repas ou capacités d'accueil	Année de référence
Restauration école primaire	144 / 1	185	Etude de l'ADEME et du GNR (2010)	Entretiens téléphoniques auprès des services de restauration	2012
Restauration collèges	180 / 1	280	Etude de l'ADEME et du GNR (2010)	« Schéma Prévisionnel de la Distribution des Collèges » ¹²	2012
Restauration lycées	180 / 1	280	Etude de l'ADEME et du GNR (2010)	« Schéma Prévisionnel de la Distribution des Lycées »	2012
Restauration universitaire	205 / 2 (RT) et 246 (RR)	315 241	Etude de l'ADEME et du GNR (2010)	Entretiens téléphoniques auprès des services de restauration des campus ¹³	2012
Restauration Santé	365 / 2	185	Etude de l'ADEME et du GNR (2010)	la cartographie des établissements sanitaires, sociaux et médico-sociaux de la Réunion : les capacités installées et autorisées (2005) ¹⁴ .	2010
Restauration Hôtelière	329 / 2	500	Etude de l'ADEME et du GNR (2010)	Site de l'Office du Tourisme ¹⁵	2012
Restauration traditionnelle	313 / 2	185	Etude « Diagnostic Déchets Organiques »(2011)	Fichiers consulaires de la CCIR	2010
Restauration rapide	365 / 2	241	Etude « Diagnostic Déchets Organiques »(2011)	Fichiers consulaires de la CCIR	2010

¹² Ces documents sont disponibles auprès du Conseil Régional et du Conseil Général respectivement en charge des collèges et lycées de l'île. En ce qui concerne les collèges et lycées privés, les données ont été obtenues auprès des établissements.

¹³ L'université de la Réunion se compose de trois campus : deux campus sud (Tampon et Saint-Pierre) et un campus nord (Saint-Denis)

¹⁴ Ce document est issu l'Agence de Santé de l'Océan Indien : www.ars.ocean-indien.sante.fr

¹⁵ Ce site répertorie le nombre d'établissements par communes ainsi que leurs capacités d'accueil selon qu'il s'agisse d'un hôtel, d'un gîte de randonnée et d'une chambre d'hôte. Les données concernant les infrastructures de tourisme sont disponibles à l'adresse suivante : <http://www.reunion.fr>

Les ratios de production de biodéchets (R_{DO}) par repas sont issus, d'une part de l'étude réalisée par l'ADEME et le Groupement National de la Restauration (GNR) pour les gisements provenant de la restauration scolaire, hôtelière et hospitalière, et d'autre part de l'étude du « Diagnostic Déchets Organiques » réalisée par le SYCTOM de l'agglomération Parisienne pour l'estimation des déchets de la restauration traditionnelle et rapide (Tableau 27).

Ces études visent à définir respectivement une méthodologie pour l'estimation de la production de biodéchets et d'huiles alimentaires usagées (HAU) au sein des établissements de restauration et des ratios de production de DIB et de déchets organiques. Cette méthode, nous a permis de calculer les tonnages de biodéchets et HAU par types d'établissements de restaurations collectives.

En résumé pour estimer les tonnages pour le secteur de la restauration collective, trois types de données ont été nécessaires :

- La capacité d'accueil, l'effectif salarial ou le nombre de repas par jour obtenus auprès des acteurs concernés par entretiens téléphoniques et recherches bibliographiques,
- Le nombre de jours ouvrés que nous avons apprécié,
- Et des ratios présentant une estimation de la quantité de déchets organiques (grammes) par repas. Les ratios pour la restauration traditionnelle et rapide sont issus du « Diagnostic Déchets Organiques » réalisée par le SYCTOM de l'agglomération Parisienne tandis que pour les autres types de restaurations, les ratios proviennent de l'étude sur l'estimation de la production de biodéchets au sein des établissements de restauration réalisée par l'ADEME et le Groupement National de la Restauration (GNR).

Des informations complémentaires sur la restauration universitaire et hospitalière sont présentées en annexe 15.

II.1.1.2 *Les HAU issus de la restauration collective*

La production de HAU est calculée à partir de ratios issus d'une étude de l'ADEME : « estimation des gisements potentiels de substrats utilisables en méthanisation » de 2013 (Tableau 28). Pour cela, nous avons estimé un grammage par repas à savoir 600g.

La quantité annuelle de HAU (Q_{iy}) engendrée par un type de restauration (i), au cours d'une année de référence (y), est donnée en multipliant le nombre de repas (Nb_R) fournis à l'année, par le ratio de production de HAU (R_{HAU}) divisé par le grammage par repas (g_{repas}). La production totale de HAU (Q_{ty}) correspond à la somme des quantités produites par les i restaurants produits par l'ensemble des restaurations collectives considérées pour l'année y . Ces expressions sont données par les relations 3 et 4 :

$$Q_{ty} \text{ (tonne/an)} \geq \sum_{i=1}^n Q_{iy} \text{ (tonne/an)} \quad (3)$$

$$Q_{iy} \text{ (t/an)} = \frac{Nb_R \times R_{HAU} \text{ (m}^3\text{/an)}}{g_{repas} \text{ (t)}} \quad (4)$$

Tableau 28 : Ratios HAU

Types de restauration	Ratios HAU (ml/repas)
Restauration thématique et traditionnelle	30
Restauration rapide	80
Restauration collective sous contrats et autres services de restaurations	8

II.1.2 Caractérisation des biodéchets présents dans les ordures ménagères

Les ordures ménagères dans ce chapitre correspondent par la fraction fermentescible des ordures ménagères (FFOM), les déchets verts (DV), les boues de stations d'épuration (STEP) et les déchets de marchés forains. Pour chacun de ces flux est présentée la démarche de caractérisation.

II.1.2.1 La FFOM et des déchets verts

Les ordures ménagères sont prises en charge par les établissements publics de coopération intercommunale (EPCI) et se composent des déchets verts, des encombrants, de la poubelle des ordures résiduelles (verte ou grise) et de la poubelle des recyclables (jaune).

Le but ici n'est pas de répertorier et quantifier la totalité de ces déchets mais uniquement les types et quantités de déchets organiques contenus dans le gisement des déchets ménagers. Pour cela, les ratios par habitants des rapports d'activités des EPCI concernant l'année 2010 ainsi que les résultats de la campagne de la « méthode de caractérisation des ordures ménagères » (MODECOM) menée en 2008 à la Réunion ont été rassemblés. Cette étude estime la proportion de FFOM à 27% sur le total d'ordures ménagères. Le traitement de ces données a permis, d'une part, de mettre en exergue les tonnages des déchets verts (DV), le bois contenu dans les encombrants ainsi que les papiers et cartons contenus dans des ordures ménagères et, d'autre part, de calculer les fractions fermentescibles des ordures ménagères (FFOMom) et de la collecte sélective (FFOMcs¹⁶) (Figure 98).

¹⁶ En effet, dû à des erreurs de tri près de 1,5% de biodéchets sont retrouvés dans la poubelle de collecte des recyclables (MODECOM, 2008).

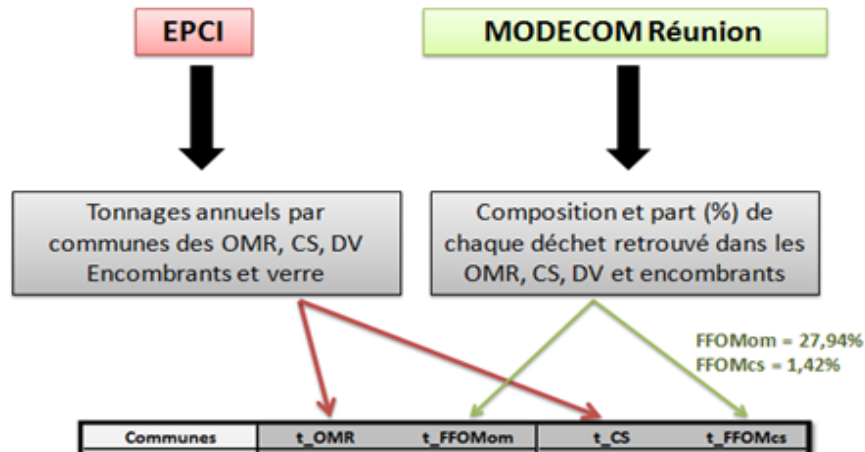


Figure 98 : Méthodologie pour l'obtention des tonnages de FFOM présents dans les OM

La quantité annuelle de FFOM et DV (Q_{iy}) engendrée par les ménages (i), au cours d'une année de référence (y), est donnée en multipliant le nombre d'habitant par iris (Pop_{iris}), par le ratio de production de OM ou DV de la commune (R_{hab}) et par le pourcentage de FFOM dans le cas des OM. La production totale de FFOM et de DV (Q_{ty}) correspond à la somme des quantités produites par les i ménages considérés pour l'année y . Les relations sont données par les équations 5 et 6 :

$$Q_{ty} \text{ (tonne/an)} \geq \sum_{i=1}^n Q_{iy} \text{ (tonne/an)} \quad (5)$$

$$\text{FFOM} \quad Q_{iy} \text{ (t/an)} = Pop_{iris} \times R_{hab} \times 27,94\% \quad (6)$$

$$\text{Déchets verts} \quad Q_{iy} \text{ (t/an)} = Pop_{iris} \times R_{hab} \quad (7)$$

II.1.2.2 Les boues de STEP

Les tonnages retenus ici sont ceux issus de l'Office de l'Eau Réunion (2010) exprimés en pourcentage de matière sèche. Ces tonnages prennent en compte l'évolution des capacités de traitement programmée, jusqu'en 2015 (extensions et constructions de nouvelles stations).

II.1.2.3 Les biodéchets des marchés forains

Pour l'évaluation des déchets organiques issus des marchés forains, nous nous sommes inspirés de l'étude du « Diagnostic Déchets Organiques » réalisée par le SYCTOM de l'agglomération Parisienne de 2011. Ce document propose un ratio de production de DIB et de déchets organiques pour les marchés forains. Ce ratio est issu de suivis de la production de déchets des marchés centraux de Nancy et de Montpellier.

La quantité annuelle de biodéchets (Q_{iy}) engendrés par un marché (i), au cours d'une année de référence (y), est donnée en multipliant le nombre d'exposants alimentaires (Nb_{Ex}) à l'année par communes, par le ratio de production de DIB (R_{DIB}) puis par le taux de déchets organiques ($\%_{DO}$). La production totale de déchets organiques (Q_{ty}) correspond à la somme des quantités produites par les i marchés produits par l'ensemble des communes considérées pour l'année y . Ces expressions sont données par les relations 7 et 8:

$$Q_{ty} \text{ (tonne/an)} \geq \sum_{i=1}^n Q_{iy} \text{ (tonne/an)} \quad (7)$$

$$Q_{iy}(t/an) = Nb_{Ex} \times R_{Do} \quad (8)$$

Le nombre d'exposants alimentaires (Nb_{Ex}) par semaine ont été obtenus par entretiens téléphoniques auprès des services communaux en charges des marchés forains et couverts de l'île.

Les données retenues pour ce gisement, sont le nombre d'exposants par marché, ramenés au nombre total d'exposants par an.

II.1.3 Caractérisation des biodéchets agricoles

Les sous-produits agricoles développés dans ce point sont les effluents d'élevages et les résidus de paille de cannes à sucre. Pour chacun d'eux, sont présentés la méthode de calcul.

II.1.3.1 Les effluents agricoles

Nous souhaitons inventorier la production annuelle de déjection animale au sein des différents élevages existants sur l'île par communes. La méthode utilisée pour déterminer ces gisements prend en compte les cheptels bovins, porcins, caprins et ovins ainsi que les poulets de chairs élevés en batteries.

Pour la quantification des effluents d'élevages (Q_{pay}) produite par une espèce animale donnée (pa) au cours de l'année de référence (y), la production moyenne annuelle d'excrétion par individu (Q_{pai}) est multipliée par l'effectif de la population (P_{ay}) recensé pour l'année d'étude et par le temps de présence en bâtiment (T_{bat}) pour une espèce donnée. La somme des gisements des n espèces étudiées représente la quantité totale d'effluents (Q_{ty}) produits par l'ensemble des élevages considérés pour l'année y . Ces expressions sont données par les relations 9 et 10 :

$$Q_{ty} \text{ (tonne/an)} \geq \sum_{i=1}^n Q_{pay} \text{ (tonne/an)} \quad (9)$$

$$Q_{pay} \text{ (t/an)} = Q_{pai} \text{ (t/tête/an)} \times P_{ay} \text{ (nombre tête/an)} \times T_{bat} \text{ (\%)} \quad (10)$$

Les effectifs des cheptels (P_{ay}) étudiés sont extraits du recensement agricole de 2010 (y). Cet inventaire répertorie le nombre de têtes en fonction du type d'élevage (bovins, porcins, caprins, ovins et poulets de chair) et par communes. Les données montrent un cheptel régional composé de bovins, de porcins, de caprins, d'ovins et de poulets de chair soit un total de 2 millions de têtes toutes catégories confondues. Les productions annuelles d'excrétion (Q_{pai}) ainsi que le temps de séjour en bâtiment (T_{bat}) par espèces sont présentés dans le Tableau 29 avec leurs références. Le reste du temps les animaux sont dans les pâturages. Le gisement d'effluents d'élevages de pâturage étant difficilement mobilisable, il ne sera pas pris en compte dans ce recensement.

Seule la méthode pour les bovins se différencie. En effet, pour déterminer les tonnages d'effluents annuels, nous avons utilisé l'effectif des cheptels par catégories (vaches laitières, génisses de renouvellement...) pour calculer des Unités Gros Bétails (UGB). **Selon la Direction Régionale de l'Alimentation et de l'Aménagement des Forêts (DRAAF), l'UGB est défini comme « une unité employée pour pouvoir comparer ou agréger des effectifs animaux d'espèces ou de catégories différentes ».** On considère comme référence qu'une vache laitière équivaut à une UGB. Les équivalences entre animaux sont basées sur leurs besoins alimentaires.

Tableau 29: Production annuelle de déjection par espèces ainsi que le temps de présence en bâtiment

Type d'élevage	Q_{pai} (t/an/individu)	Références	T_{bat} (%)	Références
Bovins	15	CORPEN (2009)	60	Biomasse Normandie (2002)
Porcins	15,4	P. Latimier et al. (1996)	100	Biomasse Normandie (2002)
Caprins/Ovins	1 à 1,3	CORPEN (2009)/T. Pelloquin (2010)	20	Biomasse Normandie (2002)
Poulets de chair	150 kg/m ² /an	CORPEN (2009)	100	Biomasse Normandie (2002)

Le calcul des UGB pour chaque catégorie de cheptel se fait en multipliant les effectifs de la catégorie (le nombre de têtes par cheptel) par un coefficient UGB spécifique. Les coefficients utilisés sont répertoriés dans le Tableau 30. Ce coefficient est ramené au prorata du temps de présence sur une année. Il s'agit bien sûr d'hypothèses puisque ces chiffres dépendent des périodes de jachères. De plus, il est important de noter la différence de temps de présence (cycle de production) entre un lot de poulets de chair élevés en 90 jours et une génisse de renouvellement de 1 à 2 ans passant l'année sur l'exploitation. Pour les poulets de chair, nous avons donc considéré six cycles de production au cours d'une année.

Tableau 30 : Coefficients UGB des bovins

Type d'animaux	Coef UGB
Vaches laitières	1,00
Vaches allaitantes	0,85
Boeufs -1 an	0,45
Boeufs 1-2 ans	0,60

(Source : Tables de l'Institut de l'Elevage et du SCEES, 2007)

II.1.3.2 *Les résidus de paille de canne à sucre*

Nous définissons sous le vocable de résidus de cannes à sucre, la paille de canne laissée au champ lors de la coupe. Nous avons considéré dans un premier temps qu'une partie de ces résidus destinée à la consommation animale pourrait être détournée pour la production d'énergie. Mais réflexion faite et suite à la rencontre d'un expert du monde sucrier réunionnais, les résidus de paille ne constituent aucun problème.

En effet, nous nous sommes attachés depuis le début de cette partie à quantifier les biodéchets qui ne sont à l'heure actuelle pas gérés et qui représentent par conséquent un poids: que faire de ces biodéchets ? Or à la Réunion, tous les résidus issus de la culture de la canne à sucre sont valorisés, par exemple, les résidus de paille de canne à sucre sont conditionnés sous forme de balles puis acheminés vers l'alimentation animale. L'autre partie des résidus de paille de cannes à sucre qui n'est pas consommée par l'animal est utilisée comme litière. Ces sous-produits étant déjà gérés de manière optimale, nous n'en tiendrons pas compte dans notre recensement des biodéchets sur l'île.

De plus, les acteurs du monde sucrier sont actuellement incapables de quantifier ces résidus de paille de canne à sucre. Il ne serait donc pas judicieux d'entamer une quantification hasardeuse qui ne saurait trouver de validation de la part des experts. Il en va de même pour les pertes de cultures maraichères. Nous avions souhaité quantifier ces pertes mais le caractère très variable de ce paramètre et l'impossibilité d'avoir de réels retours des acteurs concernés, nous ont amenés à conclure qu'il est préférable d'écarter ce flux qui se retrouve sans aucun doute en partie dans la FFOM.

II.1.4 **Caractérisation des biodéchets industriels**

Pour la création de la base de données des biodéchets industriels, nous nous sommes intéressés aux biodéchets issus des industries agroalimentaires (IAA), des commerces de gros (CG) et de détails (CD) et des grandes et moyennes surfaces (GMS).

Pour estimer la production de déchets (Q_{iy}) générée par un type activité (i), au cours d'une année (y), l'effectif salarial (ES) est multiplié par le ratio de production (R_{DO}) spécifique à l'activité ou par le ratio de production de DIB (R_{DIB}) puis par le taux de déchets organiques ($\%_{DO}$) ou encore par la surface (S). La production totale de déchets organiques (Q_{ty}) est représentée par la somme des quantités produites par toutes les activités (Q_{iy}). Les équations 11 et 12 exposent ces relations :

$$Q_{ty} \geq \sum_{i=1}^n Q_{iy} \text{ (11)}$$

$$Q_{iy(t/an)} = ES \times R_{DO} \text{ (12) (IAA)}$$

ou

$$Q_{iy(t/an)} = ES \times R_{DIB} \times \%_{DO} \text{ (12) (CD/CG)}$$

ou

$$Q_{iy(t/an)} = S \times R_{DIB} \times \%_{DO} \text{ (12) (GMS)}$$

L'effectif salarial (ES) est extrait des fichiers consulaires de la Chambre des Commerces et des Industries de la Réunion. Ces effectifs sont classés par établissement. Ces fichiers ne sont pas mis à jour régulièrement mais ils constituent néanmoins une base exhaustive. Nous avons donc décidé que l'année de référence dans ce cas était 2010.

La méthode mise en place pour déterminer les déchets organiques issus des grandes et moyennes surfaces (GMS) concerne les hypermarchés, les supermarchés, les supérettes et les épiceries. Cette approche se base comme pour les commerces de gros et de détails sur un ratio de production appréciant la quantité de déchets organiques produits par les GMS (étude « Diagnostic Déchets Organiques », 2011)¹⁷.

Les surfaces de vente (S) proviennent des bases de données de l'INSEE :

- La Base permanente des équipements des commerces de la Réunion recensée en 2011¹⁸,

¹⁷ Ce ratio est issu du suivi d'hypermarchés et supermarchés réalisé en 2004 par l'ADEME et PERIFEM, et des retours d'expériences de collectes séparées des déchets organiques mises en place par certaines GMS en Métropole, par les prestataires SARIA et PAPREC et la collectivité SITCOM Côtes Sud des Landes.

¹⁸ http://www.insee.fr/fr/themes/detail.asp?reg_id=99&ref_id=fd-bpe11

- Et l'enquête sur les points de vente du commerce de détail en 2004¹⁹.

La première dénombre par IRIS les commerces alimentaires et non alimentaires qui comprennent les hypermarchés, les supermarchés, les supérettes et les épiceries. La seconde propose, à partir d'une enquête auprès des différents commerces nationaux et des DOM, une surface moyenne de vente par magasin classée par tranche de surface exprimée en mètres carré (m²)

Les surfaces retenues sont :

- Pour les hypermarchés (> 2500m²) : 3261m²
- Pour les supermarchés (entre 400 et 2500m²) : 1193 m²²⁰
- Pour les supérettes et épiceries (entre 120 à 400m²) : 203m².

Pour quantifier les déchets organiques issus des industriels, nous avons au préalable réalisé des entretiens physiques et par téléphone. Mais le nombre de retours étant insuffisant, nous avons décidé d'utiliser des ratios provenant d'une étude faite en 2004 sur les déchets organiques engendrés par les entreprises des Côtes d'Armor menée par la CCI de la Côte d'Armor ainsi qu'une étude du même type menée par la CCI de Toulouse.

Concernant les déchets organiques produits par les industries agroalimentaires (IAA) des ratios de production estimés en fonction de l'activité (code NAF) sont utilisés. Des ratios de production par salarié par an sont identifiés pour chaque type d'activités sélectionnées pour l'étude (Tableau 31). Lorsque les ratios n'étaient pas disponibles pour certaines classes d'activités des rapprochements avec d'autres ratios ont été faits.

¹⁹ http://www.insee.fr/fr/themes/document.asp?ref_id=pointsvente04

²⁰ En l'absence de données réelles des surfaces des supermarchés, nous avons réalisé une moyenne des tranches concernées.

Tableau 31 : Activités et ratios de production considérés

Code NAF	Désignation des activités	Ratios (t/salarié/an)	%MO
0311Z	PECHE EN MER	0,06	67,8
0321Z	AQUACULTURE EN MER	0,06	67,8
1011Z	TRANSFORMATION ET CONSERVATION DE LA VIANDE DE BOUCHERIE	0,03	16
1012Z	TRANSFORMATION ET CONSERVATION DE LA VIANDE DE VOLAILLE	0,03	21
1013A	PREPARATION INDUSTRIELLE DE PRODUITS A BASE DE VIANDE	1,36	35
1020Z	TRANSFORMATION ET CONSERVATION DE POISSON, DE CRUSTACES ET DE MOLLUSQUES	0,06	16
1031Z	TRANSFORMATION ET CONSERVATION DE POMMES DE TERRE	1,51	8
1032Z	PREPARATION DE JUS DE FRUITS ET LEGUMES	3,85	13
1039A	AUTRE TRANSFORMATION ET CONSERVATION DE LEGUMES	1,51	11
1039B	TRANSFORMATION ET CONSERVATION DE FRUITS	1,51	27
1041B	FABRICATION D'HUILES ET GRAISSES RAFFINEES	0	67,8
1051A	FABRICATION DE LAIT LIQUIDE ET DE PRODUITS FRAIS	0,07	67,8
1051C	FABRICATION DE FROMAGE	0,07	56
1052Z	FABRICATION DE GLACES ET SORBETS	0,2	67,8
1061A	MEUNERIE	1,02	84
1061B	AUTRES ACTIVITES DU TRAVAIL DES GRAINS	0	84
1071A	FABRICATION INDUSTRIELLE DE PAIN ET DE PATISSERIE FRAICHE	1,53	67,8
1072Z	FABRICATION DE BISCUITS, BISCOTTES ET PATISSERIES DE CONSERVATION	0,21	67,8
1073Z	FABRICATION DE PATES ALIMENTAIRES	1,02	67,8
1082Z	FABRICATION DE CACAO, CHOCOLAT ET DE PRODUITS DE CONFISERIE	0,07	83
1083Z	TRANSFORMATION DU THE ET DU CAFE	0	67,8
1084Z	FABRICATION DE CONDIMENTS ET ASSAISONNEMENTS	0,07	67,8
1085Z	FABRICATION DE PLATS PREPARES	12,65	8
1089Z	FABRICATION D'AUTRES PRODUITS ALIMENTAIRES	12,65	8
1091Z	FABRICATION D'ALIMENTS POUR ANIMAUX DE FERME	0,9	67,8
1092Z	FABRICATION D'ALIMENTS POUR ANIMAUX DE COMPAGNIE	1,34	67,8

1101Z	PRODUCTION DE BOISSONS ALCOOLIQUES DISTILLEES	0	16
1102B	VINIFICATION	3,85	20
1105Z	FABRICATION DE BIERE	0	20
1107A	INDUSTRIE DES EAUX DE TABLE	0	67,8
1107B	PRODUCTION DE BOISSONS RAFRAICHISSANTES	0	67,8
1200Z	FABRICATION DE PRODUITS A BASE DE TABAC	0,07	67,8

(Source : Structuration de filières de traitement pour les déchets organiques de l'industrie agroalimentaire, de la restauration et de la grande distribution du département des Côtes d'Armor de 2004 et de l'étude « Diagnostic Déchets Organiques » réalisée en 2011 par le SYCTOM de Paris.)

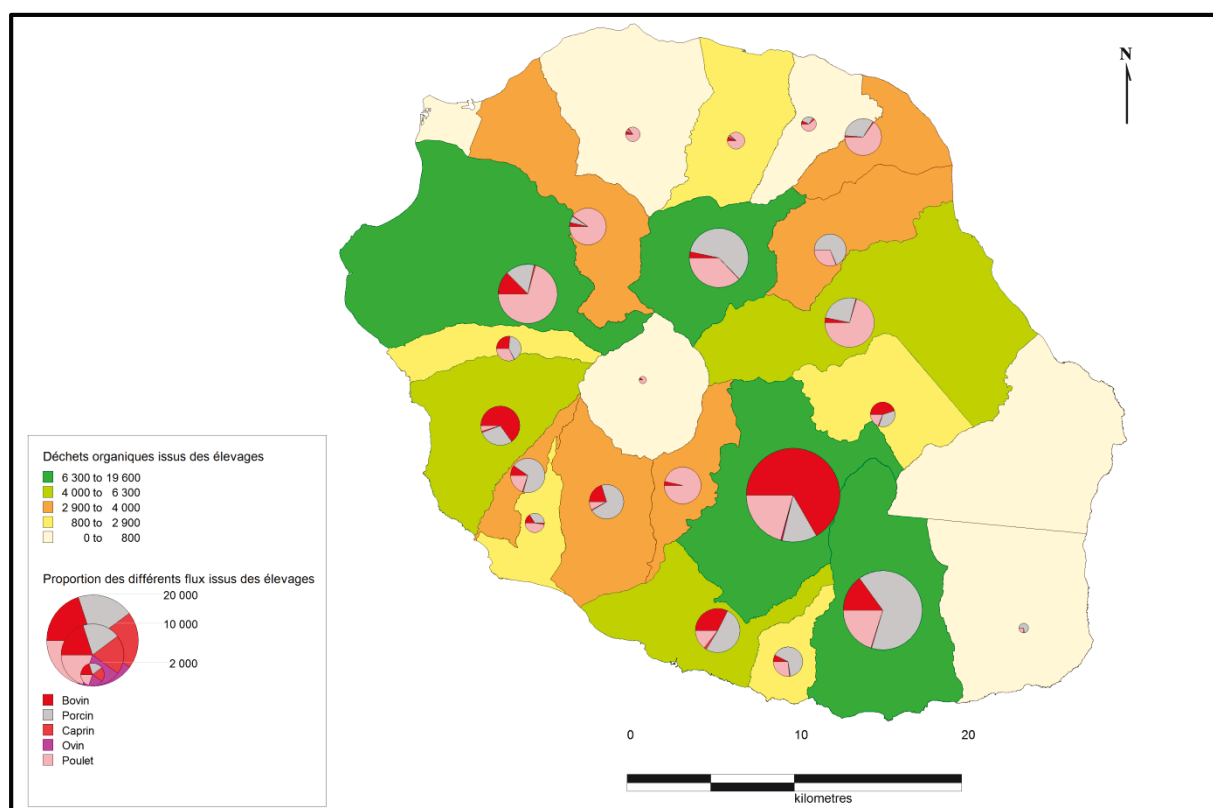


Figure 99: Répartition des déchets organiques des ménages et des collectivités

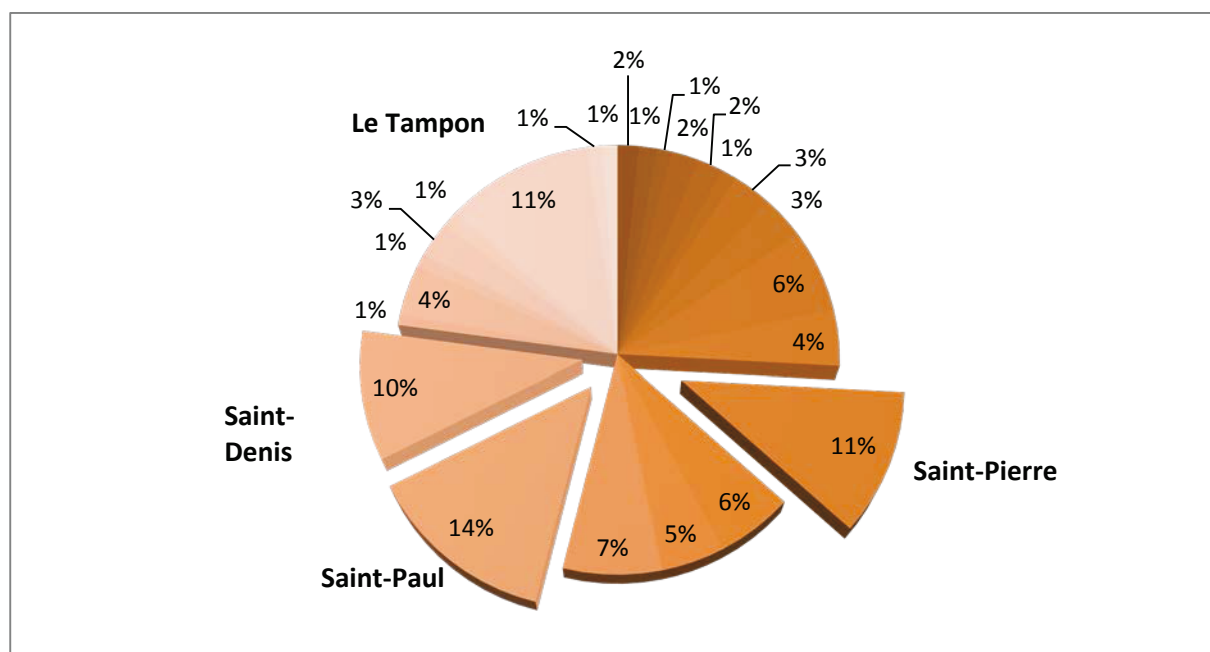


Figure 100 : Répartition des habitats individuels par communes

II.2 Potentiels de production en déchets organiques à la Réunion

Les potentiels de production des biodéchets sont issus des méthodes de calcul présentées précédemment. Nous avons pu grâce à ces méthodes déterminer les tonnages bruts de chacun des flux étudiés. Ces résultats, nous permettent d'analyser par cartographie la répartition spatiale des flux étudiés sur le territoire. La répartition spatiale permet la visualisation des zones les plus productrices en déchets et par extrapolation les zones nécessiteuses en unités de traitement (cf. chapitre 5). La synthèse de la base de données est présentée en annexe 13. Elle comprend les tonnages des différents flux classés par commune.

Les paragraphes suivants restituent donc les résultats obtenus toujours selon une classification par origines (collectivités et ménages, agricoles et industriels) ainsi que la visualisation de leurs répartitions spatiales respectives.

II.2.1 Les tonnages obtenus pour les biodéchets issus des collectivités et des ménages

Les déchets organiques ménagers et des collectivités représentent un gisement d'environ 83 416 t_{MO}/an. Ce gisement est constitué de 6 916 t_{MO}/an des déchets issus de la restauration collective, de 20 679 t_{MO}/an de fraction fermentescible des ordures ménagères, de 62 567 t_{MO}/an de déchets verts, de 5 913 t_{MO}/an de boues de stations d'épuration, de 1 381 t_{MO}/an de déchets de marchés forains et de 271 m³ de HAU. Nous pouvons d'ors et déjà précisé que nous retrouvons les mêmes résultats concernant la FFOM et les DV que ceux précisés par les EPCI à savoir 20 170 t_{MO}/an de FFOM et 60 748 t_{MO}/an de DV.

Les EPCI de la CIVIS et du TCO sont les plus producteurs de déchets organiques ménagers et des collectivités. Ces EPCI présentent respectivement les tonnages suivants : avec 23 912 t_{MO}/an et 27 148 t_{MO}/an (Figure 99). Les communes qui engendrent une quantité importante de ces déchets sont Saint-Denis pour la CINOR, Saint-Pierre pour la CIVIS et Saint-Paul pour le TCO avec respectivement 13 818 t_{MO}/an, 12 747 t_{MO}/an et 15 801 t_{MO}/an. Ces communes sont principalement composées de déchets verts et de FFOM à hauteur de 85%. Les forts tonnages en FFOM observés dans ces pôles urbains (Saint-Denis, Saint-Paul et Saint-Pierre) pourraient se justifier par la présence d'une population élevée (Tableau 32). Et les quantités importantes de déchets verts pourraient quant à elles s'expliquer par le fait que ces pôles urbains se composent en majorité d'habitats individuels. En effet, 71% des habitats à la Réunion sont individuels²¹ (Figure 100).

Tableau 32 : Répartition de la population dans les trois principaux pôles urbains

Communes	Saint-Denis	Saint-Paul	Saint-Pierre
Population	145 776	104 384,	77031

²¹ http://www.insee.fr/fr/themes/detail.asp?reg_id=99&ref_id=base-cc-logement

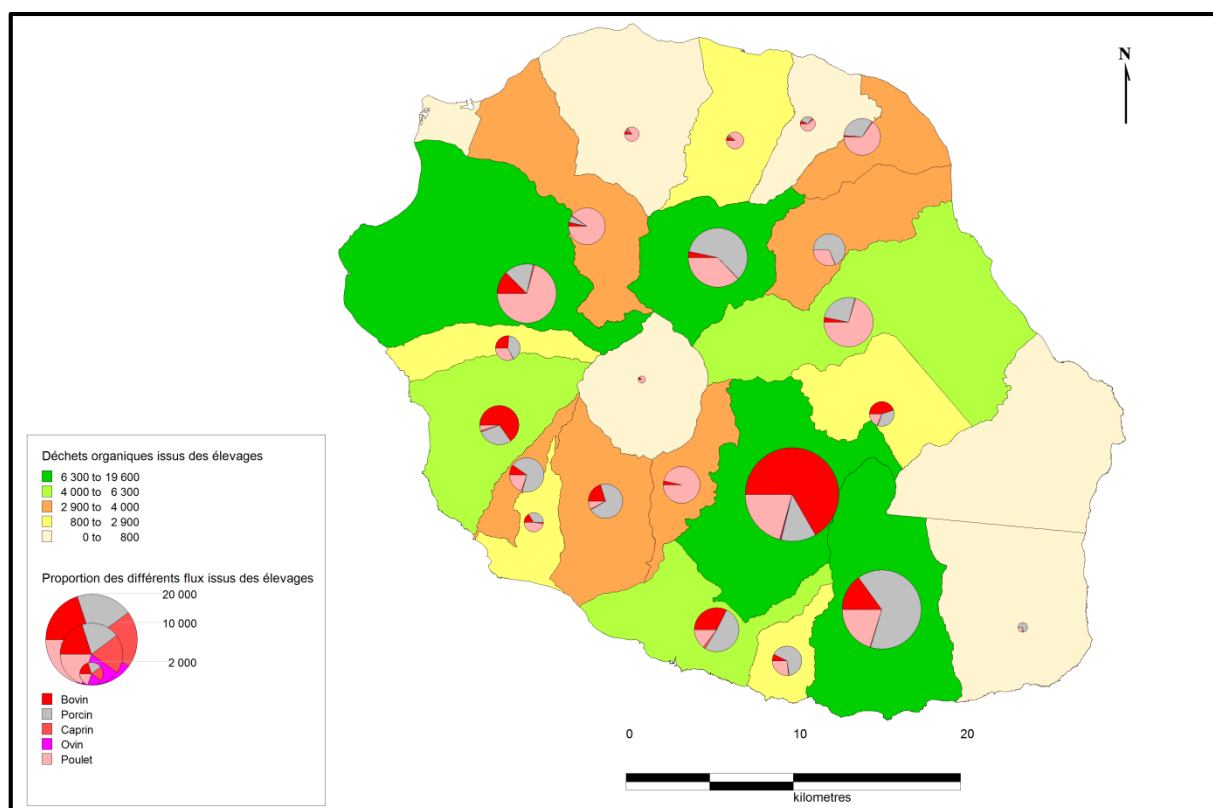


Figure 101 : Répartition des effluents agricoles par communes exprimée en tonnes par an (2010)

Tableau 33 : Pourcentage de surface d'élevage par communes

	Le Tampon	Saint- Joseph	Salazie	Saint-Paul
Surface d'élevage (%)	24,0	14,1	0,2	3,4

(Source : BD topographique 2003 et la base d'occupation des sols de 2012)

II.2.2 **Les tonnages obtenus pour les effluents d'élevages**

La production totale d'effluents d'élevages (de bovins, porcins, caprins, ovins et poulets de chair pour l'année 2010 est estimée à environ 101 331 t_{MO}. Cette production totale correspond à 24 822 t_{MO}/an de fumier bovin, à 37 385 t_{MO}/an de lisier de porc, à 632 t_{MO}/an de fumier de caprins, à 70 t de fumier d'ovins et à 38 423 t_{MO}/an de fumier de poulets de chair. Ces élevages à la Réunion pour l'année 2010 représentent respectivement 25% ; 37% ; 0,62%, 0% et 38% du total des élevages. Les effluents les plus présents à la Réunion sont donc le lisier de porcs et le fumier de bovins.

La Figure 101 représente ces gisements répartis par espèces et par communes. Elle nous montre que les communes les plus productrices en effluents agricoles sont Saint-Joseph, Salazie et Le Tampon, avec respectivement 14 986 t, 8 941 t et 19 578 t_{MO}/an. Le Tampon et Saint-Joseph font partie de la CASUD d'où l'abondance de ces sous-produits dans l'EPCI avec une production totale d'effluents de 10 894 t_{MO}/an. Ces valeurs peuvent s'expliquer par une volonté de ces communes de développer leurs activités agricoles et par conséquent de réserver une partie importante de leur foncier pour l'élevage. Le Tampon et Saint-Joseph présentent les plus forts taux de surfaces destinées à l'élevage avec respectivement 24% et 14% (Tableau 33).

En reprenant les résultats obtenus pour les effluents d'élevage, la CASUD est la plus productrice des collectivités avec 10 894 t_{MO}/an. Comme démontré plus haut les communes qui génèrent des quantités importantes en effluents font partie de l'EPCI, il s'agit de Saint-Joseph et la Tampon dont 24% de la surface totale est dédiée aux élevages.

Par ailleurs, la répartition de ces sous-produits agricoles, nous indique que ce gisement couvre une bonne partie des zones hautes de l'île. Le traitement de ces derniers offrirait un service en électricité ou autre de proximité par la mise en place d'unité de petites tailles. En effet, les élevages sont situés dans les hauts de l'île, ils permettraient d'approvisionner cette zone difficile d'accès en énergie tel que la chaleur par exemple. Les effluents agricoles sont facilement mobilisables puisqu'ils sont récupérés et stockés au fur et à mesure de la production dans des fosses à lisier ou dans des fumières dans le but de les épandre. Le transport de ce gisement d'un point A à un point B en vue de sa valorisation énergétique est tout à fait réalisable à petite échelle (Figure 102).

Comme présenté plus haut, nous avons voulu pour être le plus réaliste possible d'écarter les résidus de paille de cannes à sucre qui se trouve être un gisement difficilement mobilisable dans le cas d'une valorisation énergétique.

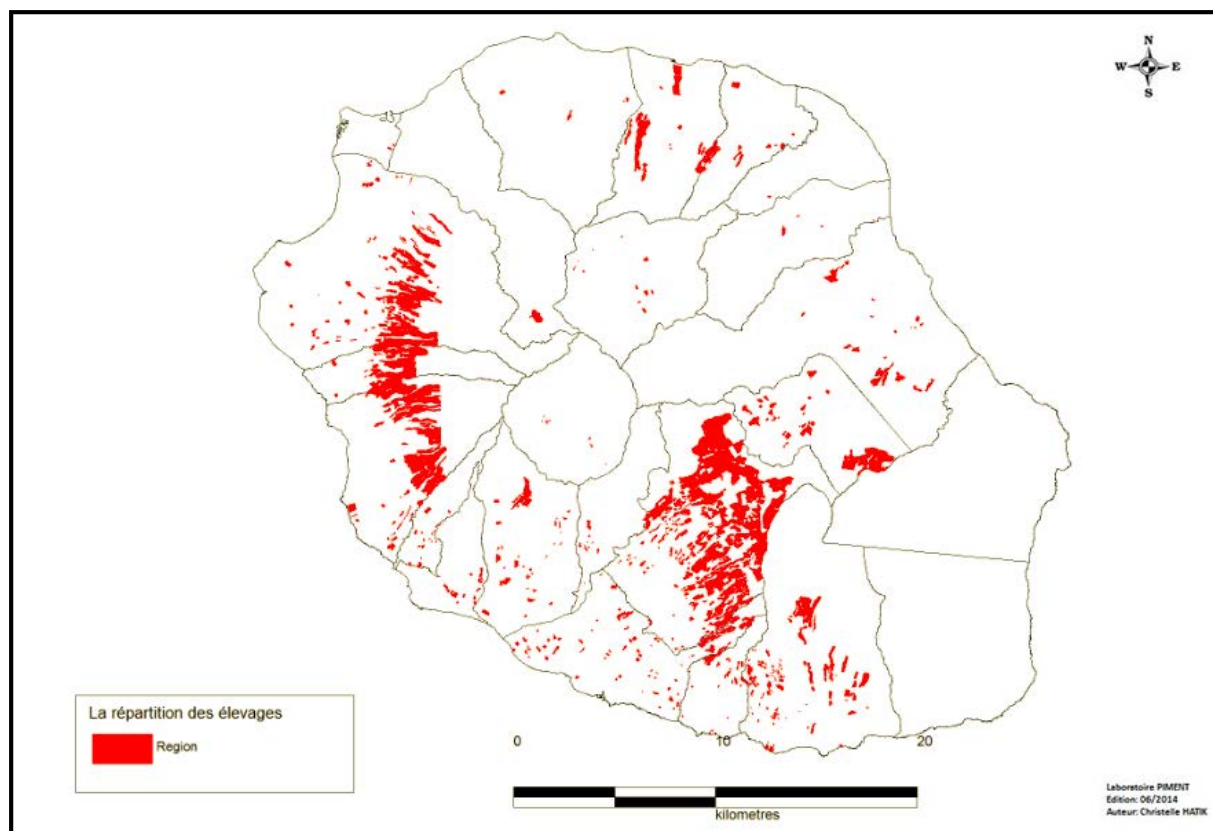


Figure 102 : Répartition des zones d'élevages (source : BOS, 2010)

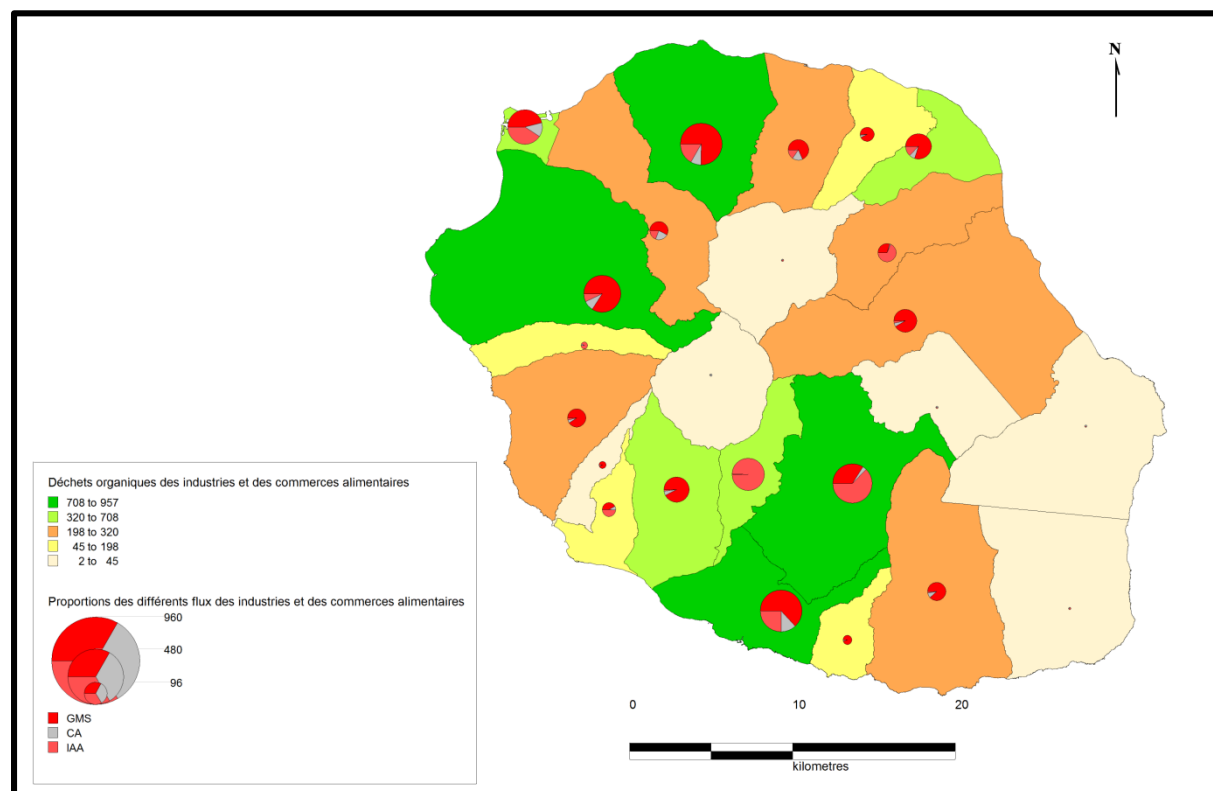


Figure 103 : Répartition des déchets organiques produits par le domaine de l'industrie exprimée en tonnes par an (2010)

II.2.3 **Les tonnages obtenus pour les biodéchets industriels**

Le secteur industriel génère environ 7 278 t_{MO}/an de déchets organiques avec 2 296 t_{MO}/an provenant des IAA, 584 t_{MO}/an de commerces alimentaires et 4 398 t_{MO}/an des grandes et moyennes surfaces (Figure 103). Le gisement le plus important est celui des IAA qui constitue environ 31% de la production totale.

La CIVIS est la plus productrice des EPCI avec 2 040 t_{MO}/an, suivi par la CIREST et le TCO avec respectivement 1 982 t_{MO}/an et 1 824 t_{MO}/an. La CIVIS constitue ainsi 28% du gisement total. Ce sont les communes de Saint-Paul, Le Tampon, Saint-Pierre, et Saint-Denis qui présentent les taux les plus forts de déchets organiques avec respectivement 708 t_{MO}/an, 851 t_{MO}/an, 856 t_{MO}/an et 957 t_{MO}/an (Figure 103). Ces communes représentent les pôles d'activités de la Réunion. En effet, la commune de Saint-Pierre est composée de plusieurs pôles spéciaux comme les zones industrielles 2 et 3 spécialisées dans l'agroalimentaire et les commerces de gros. L'agroalimentaire y domine donc avec 25% des emplois contre 20% d'industries autres (INSEE, économie de la Réunion n°137).

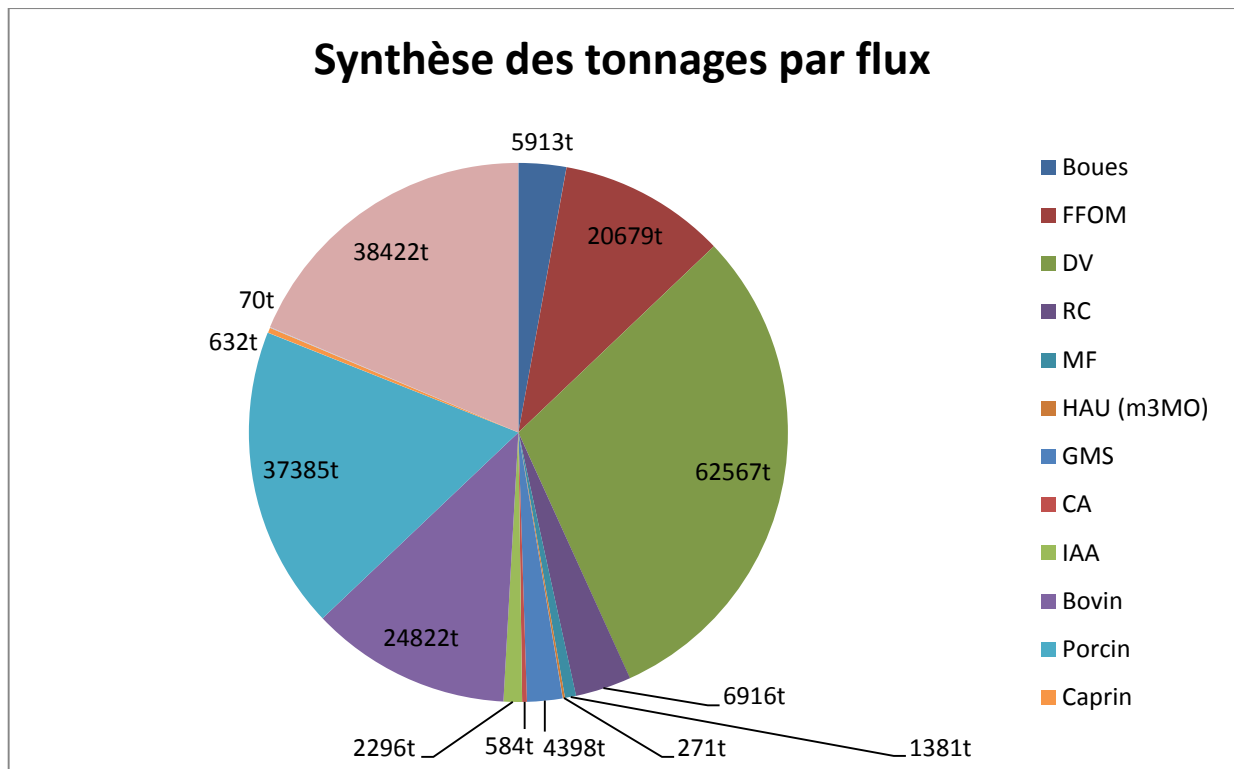


Figure 104 : Synthèse des tonnages en matières organiques obtenus par flux

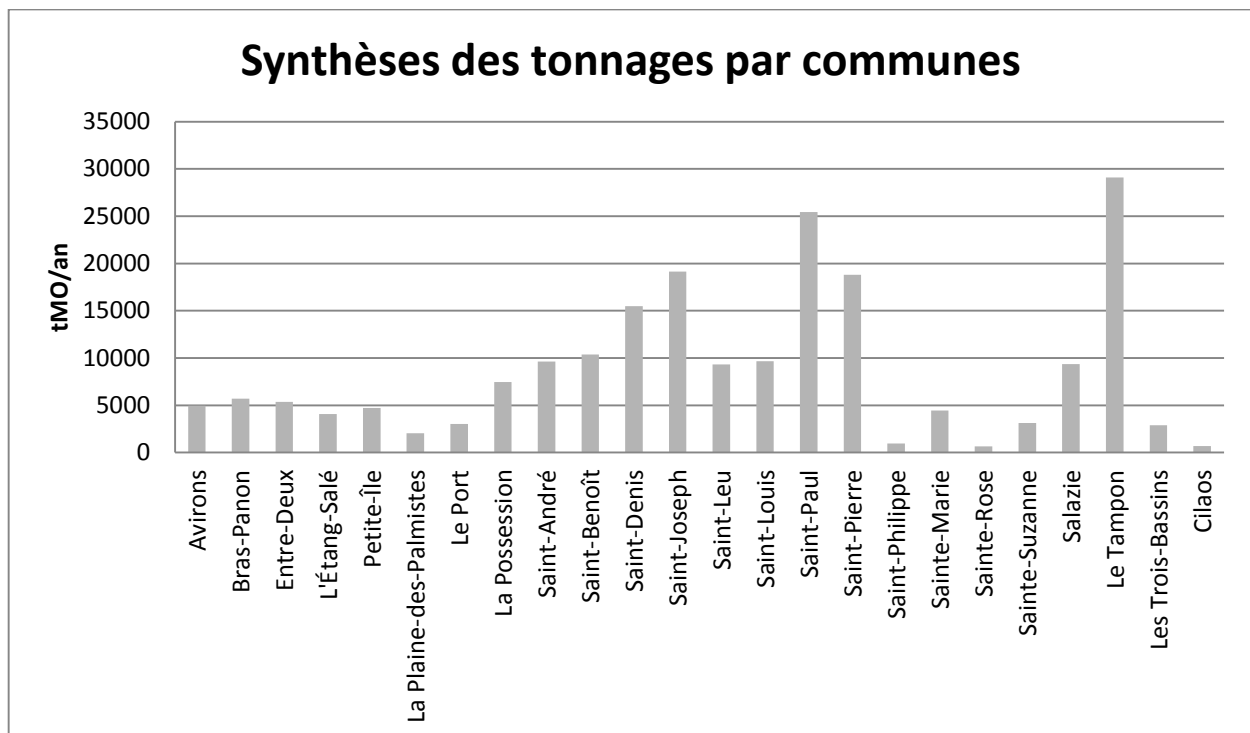


Figure 105 : La production en déchets organiques par communes

II.2.4 **Conclusion générale sur les gisements de biodéchets à la Réunion**

Le gisement des déchets organiques à la Réunion représente au total 206 336 t_{MO} par an (Tableau 34, Figure 104). L'étude des gisements des déchets organiques à la Réunion montre la prédominance de certaines communes et EPCI. Il se trouve que ces prédominances sont liées principalement à leurs activités agricoles. En effet, la CASUD produirait le plus de déchets organiques avec environ 38 785 t_{MO} d'effluents agricoles, ce qui représente 19% de sa production en déchets. Il en ressort donc que les villes les plus productrices de déchets sont Saint-Joseph, Le Tampon, Saint-Pierre et Saint-Paul (Figure 105). Ces résultats étonnants sont dus à l'abondance des effluents agricoles qui, de par leur ordre de grandeur (de l'ordre des centaines de milliers), exercent une attraction et écrase les autres données plus petites (de l'ordre du millier). Si nous continuons notre observation des flux, nous pouvons voir qu'outre l'abondance des effluents d'autres flux sont également prédominants à plus petite échelle à savoir (Figure 104) : la restauration collective, la fraction fermentescible des ordures ménagères et les déchets verts.

Maintenant que nous avons déterminé et brièvement détaillé les tonnages de déchets organiques à la Réunion, il est important de se recentrer sur nos objectifs. A ce stade, nous possédons une base de données exhaustive et quantitative des biodéchets, nous pouvons donc observer leur répartition spatiale afin de déterminer les lieux les plus nécessaires en unités de traitement. Pour cela, nous partons sur l'hypothèse simple que les zones les plus productrices doivent être équipées d'unités de traitement pour répondre au principe de proximité (gestion au plus près de la source). Pour mettre en exergue cette répartition spatiale, nous avons opté pour une représentation en dégradé de couleur nommé gradient. Ce choix, nous permet de lisser les données et d'obtenir un visuel précis des zones à forte production (en rouge) des zones les moins productrices en bleu) (Figure 106). Mais cette carte doit toutefois être croisée avec les contraintes urbanistiques à savoir les zones protégées, les zones construites..., afin d'en extraire les zones (terrains, surfaces) potentiellement aptes à accueillir des unités de traitement (Cf. chapitre 5).

En résumé, les graphiques 7 et 9 exposent de manière synthétique les résultats globaux obtenus par communes et par flux mais ne nous permettent pas une analyse approfondie des flux présents dans chacune d'elles du fait du nombre important de variables. C'est pourquoi, nous avons décidé de réaliser une analyse plus poussée à l'aide de méthodes statistiques. De ce fait et afin de compléter cette analyse de base, il serait intéressant de pouvoir mettre en évidence l'existence de relations entre les différents flux de biodéchets et ainsi proposer un regroupement de communes basé sur ces liens. A terme, l'objectif est de proposer des scénarios de gestion des biodéchets adaptés à aux aspects qualitatifs et quantitatifs du gisement, en appuyant cette approche par la proposition de sites potentiels d'implantation d'unité de traitement.

Tableau 34 : Synthèse des résultats obtenus pour la Réunion

Exprimé en t_{MO}/an	CINOR	CIREST	CASUD	CIVIS	TCO	Total gisement
Boues	1805	651	40	1943	1475	5913
FFOM	5275	3375	2745	4596	4689	20679
DV	9838	7566	10050	16605	18508	62567
RC	1645	754	1069	1406	2041	6916
MF	549	133	157	178	365	1381
HAU (m³_{MO})	74	35	35	57	69	271
GMS	1014	661	473	1050	1199	4398
CA	121	55	51	147	210	584
IAA	206	227	1150	298	414	2296
Bovin	184	1372	15419	3170	4676	24822
Porcin	282	11146	12303	9902	3752	37385
Caprin	70	84	114	218	145	632
Ovin	0	6	55	8	2	70
Poulet	1980	11660	10894	3306	10584	38423
Total EPCI	23045	37723	54555	42882	48130	206336

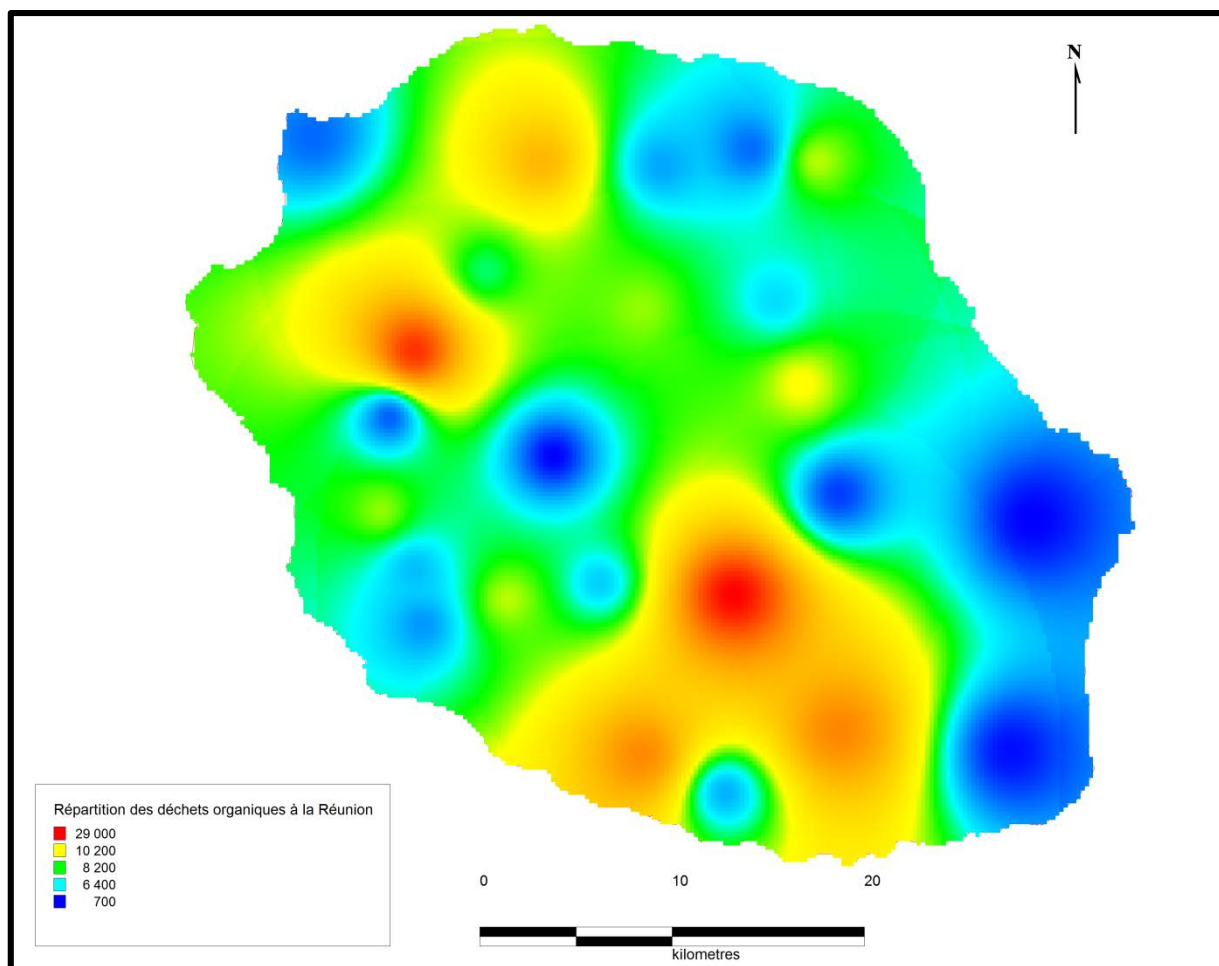


Figure 106 : Répartition des déchets organiques à la Réunion (t_{MO}/an)

III. Analyses statistiques et interprétations de la base de données

L'étude statistique réalisée a pour vocation de démontrer une quelconque organisation au sein des communes. En effet, la photographie des comportements des réunionnais en matières de déchets permet d'analyser un certain nombre d'indicateurs comme la répartition des déchets par commune, des tonnages ou encore des flux de déchets.

Précédemment un certain nombre de biodéchets ont été identifiés et quantifiés. Ces informations ont également permis de visualiser la répartition spatiale de ces flux sur le territoire. Mais à ce stade de l'étude une analyse plus poussée est de rigueur. En effet, il serait pertinent de déterminer d'éventuelles corrélations entre communes. La question que nous nous posons est : Est-ce que certaines communes présentent des comportements similaires en termes de composition et de tonnages ? Si c'est effectivement le cas et que nous constatons des similitudes au niveau de ces indicateurs, nous pourrions proposer une classification des communes et donc d'établir une **typologie**.

L'obtention de typologies oriente vers une autre interrogation à savoir : quels scénarios de gestion, pour quelles communes ? A cela, il est possible de soutenir l'hypothèse que si deux communes présentent le même profil, elles peuvent donc dans l'absolu être gérées de la même manière. Une typologie 1 sera associée à un ou plusieurs scénarios qui s'appliqueront à toutes les communes du groupe 1 et ainsi de suite.

Cette méthode facilite la mise en place des scénarios et favorise le recoupement des informations. Il n'existera donc plus qu'un système de gestion des déchets généralisé sur l'île mais quelques systèmes de gestions adaptés aux volumes, aux flux et aux communes. De plus, s'il s'avère que certaines communes de même typologie sont localisées dans le même secteur géographique ou font partie du même EPCI, elles pourront mutualiser leurs équipements et leur gestion des flux.

L'analyse poussée de la base de données pourrait conduire à une remise en question du système actuel de gestion basée sur la concentration et la territorialisation des moyens de traitement à une gestion de plus petite échelle plus adaptée et raisonnée. Pour ce faire, l'analyse est opérée en cinq étapes, de la plus élémentaire à la plus complexe afin de décortiquer les résultats et ainsi de pouvoir proposer une typologie de commune. Ces étapes sont les suivantes :

- L'analyse univariée
- L'analyse bivariée
- La régression linéaire multiple
- L'ANOVA
- Et l'Analyse en Composante Principale (ACP).

Pourquoi procéder en plusieurs étapes ? Il est vrai que dans la pratique, seule une ou deux méthodes sont utilisées, mais nous avons choisi d'évoluer pas à pas dans notre base de données afin d'en extraire chaque information qui pourrait être perdue dans des analyses directement plus complexes.

Pour la réalisation de ces analyses, nous disposons d'une base de données comprenant une variable qualitative : les communes au nombre de 24 et des variables quantitatives : les flux de biodéchets (FFOM, boues, IAA, CG...) au nombre de 15. Ces variables représentent les tonnages en matière organique de tous les flux de déchets précédemment recensés. Il est important de préciser que tous les résultats présentés

sont issus du chapitre 4. Les données de bases sont donc toutes exprimées en tonnes par an.

Ce titre III présente donc les analyses statistiques développées pour pouvoir identifier les typologies de communes. L'analyse univariée permet l'étude des variables quantitatives (flux) une à une et de les comparer via des statistiques descriptives (moyenne, médiane, quartile....) et ainsi d'observer leur comportement. L'analyse bivariée s'attache à étudier deux à deux les flux et dans une phase préliminaire pour déceler les éventuelles corrélations entre flux. La régression linéaire multiple est mise en place pour observer les corrélations d'un flux à l'ensemble des autres flux. Nous obtenons ainsi une ou plusieurs corrélations pour un flux donné. Pour le moment les analyses menées sont essentiellement accès sur le comportement (individuellement, deux à deux ou en opposition à l'ensemble) des flux (variables quantitatives) et non sur les communes (variables qualitative).

C'est pourquoi, nous réalisons une ANOVA. Une ANOVA ou analyse de la variance permet d'observer les liens entre une variable qualitative et des variables quantitatives. A la suite de cette approche, il est possible de déterminer l'existence de liens entre les flux et les communes. Dans ce cas, certaines communes auront des liens plus importants avec certains flux du fait de leur abondance sur le territoire considéré. Et pour conclure cette série d'analyse, une ACP est réalisée et qui permet de regrouper toutes les informations précédentes dans une seule et même analyse, c'est-à-dire comparer l'ensemble des variables quantitatives et qualitatives de manière globale et non plus détachées (une à une, deux à deux ou une à plusieurs...). Mais pourquoi ne pas avoir simplement et directement mise en œuvre une ACP ? L'ACP est particulièrement délicate à interpréter, de ce fait, il est possible de s'appuyer sur les résultats des analyses précédentes pour orienter nos conclusions. Nous possédons un panel d'interprétations qui se recoupent à partir d'analyse différentes ce qui favorisent la validation de l'expertise.

Statistique	Effluents	FFOM	DV	Boues	RR	RT	Hôtels	Santé	Scolaire	MF	HAU	GMS	CG	CD	IAA
Nb. d'observations	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
Minimum	0	49	47	0	1	0	0	0	14	0	0	0	0	1	0
Maximum	19578	4075	11466	1638	94	61	810	190	763	475	18	720	77	45	270
1er Quartile	975	160	612	0	2	1	8	0	30	0	1	0	0	3	3
Médiane	3330	657	1795	43	5	3	35	6	71	12	2	120	2	7	10
3ème Quartile	4671	1072	3219	254	16	7	99	33	220	80	4	293	11	17	48
Somme	101331	20679	62567	5913	317	210	2280	734	3375	1381	87	4398	298	287	1165
Moyenne	4222	862	2607	246	13	9	95	31	141	58	4	183	12	12	49
Variance (n-1)	22860735	878891	8228645	178521	420	238	29901	2911	30995	10738	18	42258	451	151	5696
Ecart-type (n-1)	4781	937	2869	423	20	15	173	54	176	104	4	206	21	12	75

Tableau 35 : Synthèse des résultats obtenus pour l'analyse descriptive

III.1 Analyse univariée

Une analyse univariée des différents flux de déchets est réalisée sur les 24 communes de l'île. Cette analyse a pour but d'étudier les variables séparément afin de les décrire. Les paramètres suivants sont déterminés pour chaque variable: le minimum, le maximum, le premier quartile, la médiane, le troisième quartile, la moyenne, la variance et l'écart-type. Ces données constituent ce que l'on appelle communément les statistiques descriptives (Tableau 35).

Ainsi, l'étude montre que les minimums varient entre 0 et 49 tonnes par an. En effet, certaines communes comme par exemple les Avirons, l'Entre-Deux et Saint-Philippe ne produisent pas de biodéchets liés à la présence d'établissements de santé du fait de l'absence de cette activité sur leur territoire. De même, la Petite-Île, la Plaine des Palmistes et la Possession ne produisent pas de boues d'épurations sur leur territoire du fait de l'absence de stations d'épuration. Cela ne signifie pas pour autant que ces communes sont exemptes de boues mais que leurs boues sont traitées dans une commune voisine possédant une unité de traitement. Dans ce cas, les flux sont comptabilisés dans les communes assurant leur gestion.

Les maximums, eux varient beaucoup, entre 18 à 19 578 tonnes annuelles de matières organiques d'un flux à un autre. Les effluents sont les biodéchets les plus produits avec un taux de production élevé notamment dans la commune du Tampon. Comme décrit dans le titre II de ce chapitre, le Tampon possède près de 24% de son foncier réservé à l'élevage. Il s'agit du rapport le plus fort de l'île. Le Tampon rassemble également 43% des élevages bovins sur son territoire (Agrest, 2010). Par ailleurs, Saint-Denis présente le taux le plus fort en production d'HAU. Ce résultat est directement lié à la forte concentration en restauration collective de la ville.

Les quartiles sont de trois sortes : le premier quartile, le deuxième quartile ou la médiane et le troisième quartile. Le premier quartile permet d'avoir une information sur 25% des variables étudiées, ici 25% des communes ont des tonnages inférieurs 160t_{MO} pour la FFOM. Le deuxième quartile, nous donne une information sur 50% de la population, ici 50% des communes ont un tonnage inférieur à 64t_{MO} pour les boues. Et le troisième quartile renseigne sur 75% du panel, soit 75% des communes ont moins de 220t_{MO} de biodéchets issus des restaurations scolaires ou 25% des communes produisent plus de 220t_{MO} de ces biodéchets.

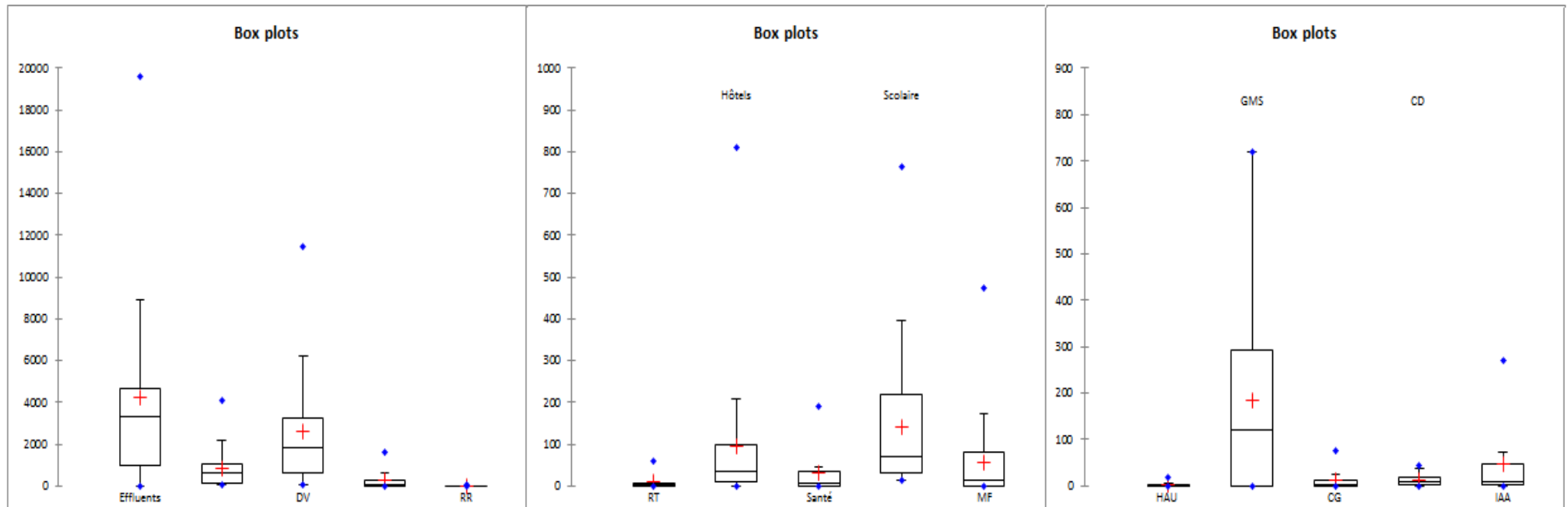


Figure 107 : Box plot des gisements étudiés

Pour compléter l'analyse descriptive des données, l'observation des box plots traduisent les données chiffrées en graphiques (Figure 107). Ces box plots ou boîte à moustaches montrent une distribution dissymétrique des données selon les communes. Les valeurs sont donc très dispersées surtout pour les valeurs hautes (supérieures à la médiane) et hétérogènes.

Depuis le début de cette analyse, nous constatons que les résultats observés sont très différents d'un flux à l'autre. Les variances très importantes observées permettent de confirmer cette constatation. Ces observations, nous amènent à une première conclusion sur **la répartition hétéroclite des flux de biodéchets d'une commune à une autre**. Il semble par conséquent que la **répartition des flux soit liée au caractère plus urbain ou rural, du type d'activité (économique ou autre) ou encore de l'attractivité d'une commune par rapport à une autre**.

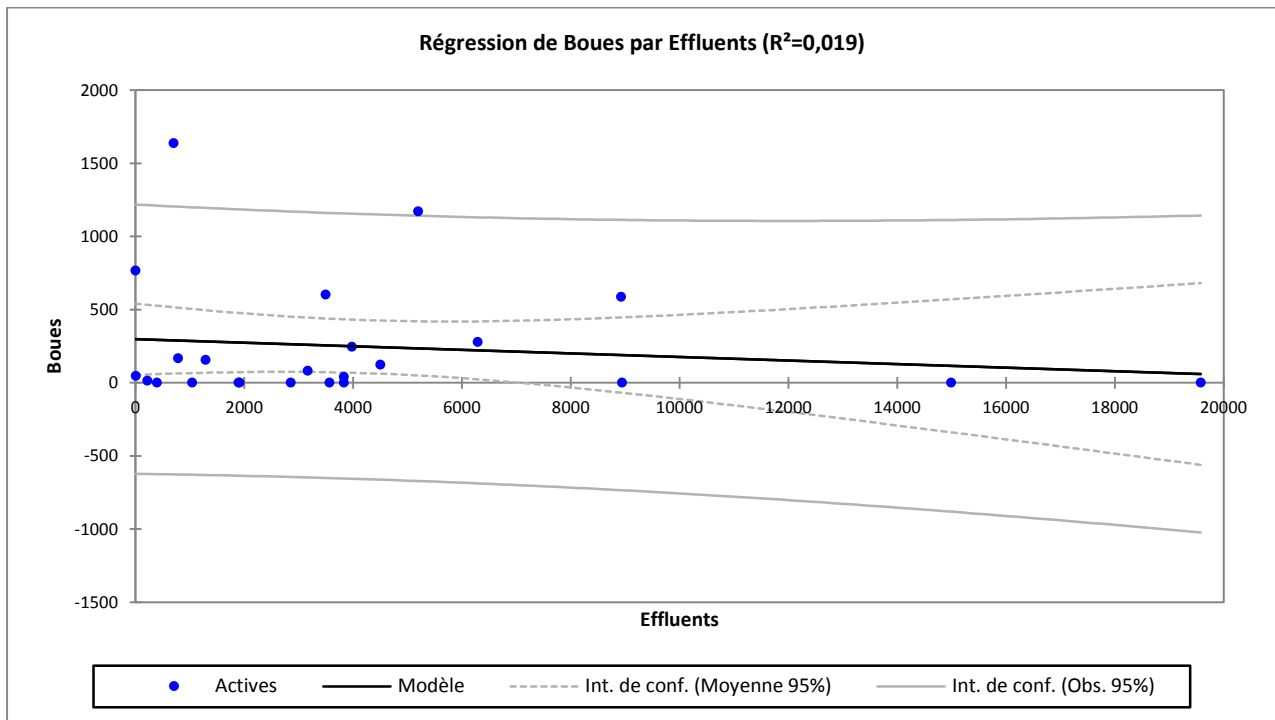


Figure 108: Nuage de points correspondant aux variables boues et effluents

Tableau 36 : Matrice de corrélation entre les variables boues et effluents

Variables	Effluents	Boues
Effluents	1,000	-0,137
Boues	-0,137	1,000

III.2

III.2 Analyses bivariées

L'analyse bivariée permet de déterminer s'il existe des relations entre deux variables (deux flux de déchets). Dès le départ, nous pouvons orienter notre analyse sur des hypothèses, à savoir que certains flux peuvent influencer d'autres flux de déchets. Afin d'illustrer ces relations entre variables, nous considérons deux exemples entre :

- Les boues urbaines et les effluents agricoles,
- Les boues urbaines et la FFOM.

III.2.1 Lien entre les boues urbaines et les effluents agricoles

Dans ce « paragraphe », nous souhaitons mettre en évidence l'existence d'une relation éventuelle entre ces deux variables quantitatives et ainsi d'en déterminer sa nature. Pour cela, nous effectuons un tri croisé entre les valeurs de ces deux variables ainsi qu'une régression linéaire simple.

Le nuage de point de la régression linéaire, nous permet de visualiser la répartition des observations simultanées de ces deux variables quantitatives. Sur la Figure 108, une dispersion du nuage de point est observée. Ce même phénomène est présent sur la matrice de corrélation qui montre un coefficient de corrélation négatif de -0,137 entre ces deux variables (Tableau 36). De même le coefficient de détermination de ces variables (R^2) est de l'ordre de 0,019, ce qui traduit une absence d'influence de la variable boues sur la variable effluents. **La production de boues urbaines n'a aucune corrélation sur la production d'effluents agricoles. Ces variables n'ont donc pas de lien entre elles.**

III.2.2 Lien entre les boues et la FFOM

Le nuage de points obtenu avec les données de ces deux variables semble établir une droite approximative mettant en évidence la relation entre ces deux variables (allure de la distribution des points) (Figure 109). La démarche adoptée par le logiciel utilisé ici XLSTAT est la suivante :

La droite passant le mieux possible au milieu du nuage de points $(x_i, y_i, i = 1, \dots, n)$ est donnée par l'équation : $\hat{y} = a + bx$. Le logiciel XLSTAT utilise, la méthode des moindres carrés qui consiste à rechercher les paramètres a et b qui minimisent la quantité :

$$f(a, b) = \sum_{i=1}^n (a + bx_i - y_i)^2$$

Les calculs montrent que les paramètres optimaux sont donnés par :

$$b = \frac{COV(X,Y)}{V(X)} \quad \text{et} \quad a = \bar{y} - b\bar{x}$$

b est la pente de la droite et a l'ordonnée à l'origine.

Le logiciel XLSTAT donne, les résultats concernant les paramètres de la droite:

$$\text{Boues estimées} = -90,25 + 0,39 \cdot \text{FFOM}$$

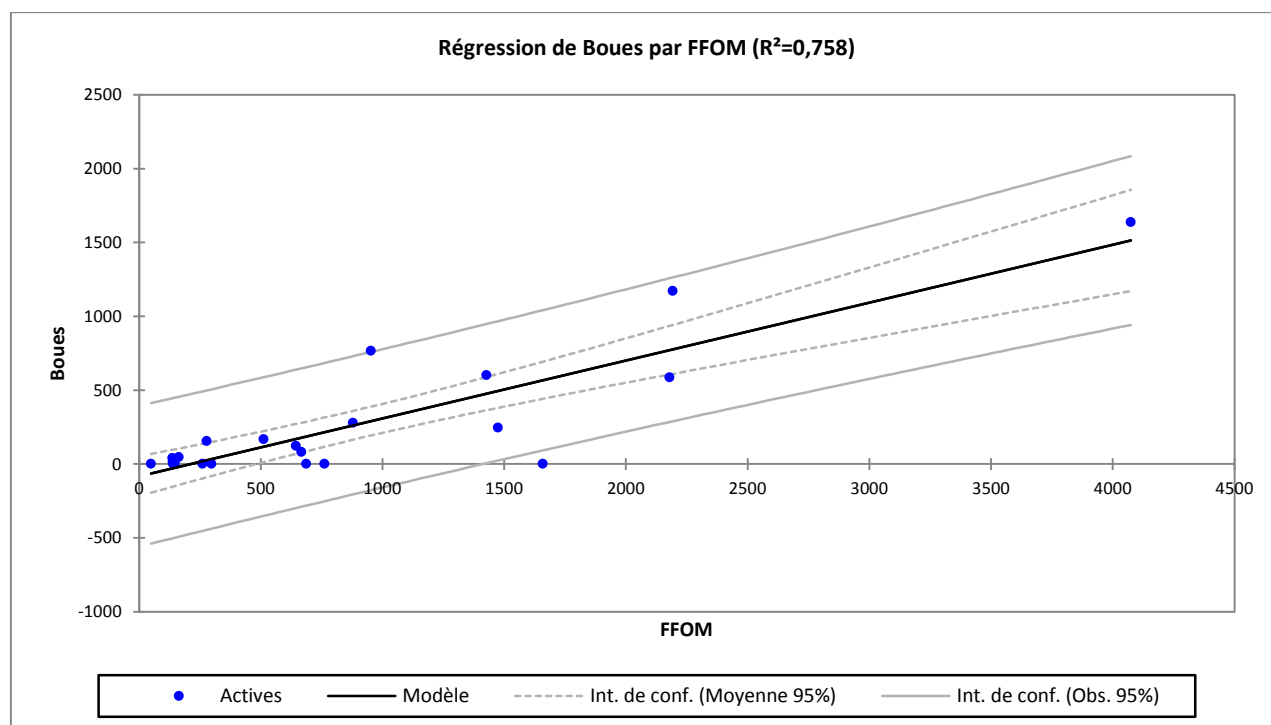


Figure 109: Nuage de points correspondant aux variables boues et FFOM

Tableau 37 : Matrice de corrélation entre les variables santé et hôtel

Variables	FFOM	Boues
FFOM	1,000	0,867
Boues	0,867	1,000

Cette équation permet d'estimer le tonnage de la variable boues pour des tonnages donnés de la variable FFOM.

Pour les valeurs ajustées ou prédites on utilise la notation : $\hat{y}_i = a + bx_i$ $i = 1, \dots, n$

Et les erreurs ou résidus sont donnés par : $e_i = y_i - \hat{y}_i$ $i = 1, \dots, n$

La somme des erreurs est nulle, en effet :

$$\sum_{i=1}^n e_i = \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i) = 0$$

En d'autres termes les erreurs positives et les erreurs négatives se compensent, la droite des moindres carrés passe toujours par le milieu du nuage de points.

La notion de liaison entre x et y signifie qu'une variation de x entraîne une variation de y . La formule de décomposition de la variation permet de préciser la part de la variation de y (boues) expliquée par la variation de x (FFOM).

Cette formule s'écrit :

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 + \sum_{i=1}^n e_i^2$$

Le terme $\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$ s'appelle la somme des carrés totale (SCT) et mesure la variation globale des y_i autour de leur moyenne $\bar{y}$.

Le terme $\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2$ s'appelle la somme des carrés expliquée (SCE) par la variable x . C'est la part de la variation de y expliquée par la variable x . Ce terme peut-être calculé facilement par la relation :

$$SCE = \frac{(\sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}))^2}{\sum_i (x_i - \bar{x})^2}$$

Le terme $\sum_{i=1}^n e_i^2$ est la somme des carrés résiduels (SCR). C'est la part de variation de y non expliquée par x . Dans la pratique la somme des carrés résiduelles (SCR) se calcule à l'aide de la formule : $SCR = SCT - SCE$

Le coefficient de détermination $R^2 = \frac{SCE}{SCT}$, mesure la part de la variation de y expliquée par la variation de x .

Le coefficient de détermination $R^2 = 1$ correspond à la situation où tous les points sont alignés. En effet, si $R^2 = 1$ alors $SCR = 0$ ce qui signifie que tous les résidus $e_i = 0$. A l'opposé, un coefficient de détermination égale à 0 correspond à la situation où la droite des moindres carrés est horizontale et il n'y a aucune liaison linéaire entre y et x .

Dans notre cas on trouve $R^2 = 0,758$ ce qui signifie que 76% des boues s'expliquent par la variation de la FFOM (Tableau 36).

- Intervalle de confiance pour la valeur moyenne de y

Le modèle $y_i = a + bx_i + \varepsilon_i$ $i = 1, \dots, n$, ayant été ajusté sur un échantillon, on peut l'utiliser pour faire de la prédiction.

Les paramètres **a** et **b** en gras sont respectivement l'intercepte et la pente de la droite dans la population. Ces deux paramètres sont appelés les coefficients de régression. Ils ne sont pas connus.

Les $\varepsilon_i, i = 1, \dots, n$, sont des variables aléatoires, appelées erreurs. On fait les hypothèses suivantes : on suppose que les ε_i suivent une loi normale de moyenne 0 et de variance σ^2 et qu'elles sont indépendantes.

L'intervalle de confiance du paramètres **b** est donné par : $b - u < \mathbf{b} < b + u$

Avec :

$$u = t_{\alpha/2}(n-2) \frac{s}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2}}$$

Où $t_{\alpha/2}(n-2)$ est la valeur critique d'une loi de Student, α le risque d'erreur et $s = \frac{SCR}{n-2}$ est appelé par le logiciel R "Residual standard error" son carré est une réalisation de l'estimateur sans biais de σ^2 .

L'intervalle de confiance de l'intercepte **a** est donné par : $a - v < \mathbf{a} < a + v$

Avec :

$$v = t_{\alpha/2}(n-2) s \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{\bar{x}^2}{\sum (x_i - \bar{x})^2}}$$

- Intervalle de prédiction pour une valeur de y

Dans l'intervalle de prévision de la future valeur de y, il faut tenir compte de l'ajout de la perturbation ε . Il est donné par la formule :

$$[\hat{y}_0 - z, \hat{y}_0 + z]$$

Où

$$z = t_{\alpha/2}(n-2) s \sqrt{1 + \frac{(x_0 - \bar{x})^2}{\sum (x_i - \bar{x})^2}}$$

En faisant varier x_0 , on obtient une région de confiance de la droite $\hat{y} = \mathbf{a} + \mathbf{b}x$ au risque α . Cette région est représentée aussi dans la Figure 108.

Nous avons pu démontrer avec une analyse bivariée qu'il existe des liens ou pas entre les variables étudiées. Dans un but de synthèse, nous réalisons une régression linéaire multiple de ces variables (flux de déchets) afin de les comparer entre elles. Cette analyse permet d'étudier les variations d'une variable dite dépendante (à expliquer) aux variations de plusieurs variables dites indépendantes (explicatives) afin d'observer de manière globale leurs corrélations.

Tableau 38 : Matrice de corrélation des variables étudiées

Variables	RR	RT	Hôtels	Santé	Scolaire	MF	HAU	GMS	CG	CD	IAA	Effluents	FFOM	DV	Boues
RR	1,000	0,923	0,564	0,878	0,911	0,922	0,947	0,866	0,561	0,807	0,482	0,057	0,945	0,688	0,845
RT	0,923	1,000	0,772	0,893	0,856	0,853	0,935	0,876	0,571	0,777	0,490	0,053	0,891	0,790	0,829
Hôtels	0,564	0,772	1,000	0,574	0,598	0,442	0,689	0,599	0,298	0,518	0,101	0,291	0,565	0,779	0,381
Santé	0,878	0,893	0,574	1,000	0,806	0,809	0,892	0,911	0,671	0,915	0,612	0,119	0,889	0,808	0,887
Scolaire	0,911	0,856	0,598	0,806	1,000	0,873	0,959	0,892	0,365	0,852	0,333	0,346	0,965	0,763	0,762
MF	0,922	0,853	0,442	0,809	0,873	1,000	0,878	0,805	0,572	0,724	0,585	0,015	0,900	0,546	0,862
HAU	0,947	0,935	0,689	0,892	0,959	0,878	1,000	0,943	0,520	0,889	0,425	0,219	0,978	0,842	0,815
GMS	0,866	0,876	0,599	0,911	0,892	0,805	0,943	1,000	0,622	0,927	0,534	0,216	0,953	0,851	0,870
CG	0,561	0,571	0,298	0,671	0,365	0,572	0,520	0,622	1,000	0,554	0,823	-0,133	0,528	0,423	0,684
CD	0,807	0,777	0,518	0,915	0,852	0,724	0,889	0,927	0,554	1,000	0,488	0,372	0,898	0,873	0,765
IAA	0,482	0,490	0,101	0,612	0,333	0,585	0,425	0,534	0,823	0,488	1,000	-0,182	0,505	0,295	0,703
Effluents	0,057	0,053	0,291	0,119	0,346	0,015	0,219	0,216	-0,133	0,372	-0,182	1,000	0,204	0,439	-0,137
FFOM	0,945	0,891	0,565	0,889	0,965	0,900	0,978	0,953	0,528	0,898	0,505	0,204	1,000	0,783	0,867
DV	0,688	0,790	0,779	0,808	0,763	0,546	0,842	0,851	0,423	0,873	0,295	0,439	0,783	1,000	0,586
Boues	0,845	0,829	0,381	0,887	0,762	0,862	0,815	0,870	0,684	0,765	0,703	-0,137	0,867	0,586	1,000

III.3 Régression linéaire Multiple

La régression linéaire simple permet comme préciser en introduction, d'expliquer une variable quantitative Y à l'aide d'une seule variable quantitative X . Dans la pratique, plusieurs variables sont nécessaires pour expliquer un phénomène (une variable). Ainsi nous avons pensé à étendre la régression simple à plusieurs variables explicatives.

Le modèle statistique utilisé par XLSTAT est le suivant:

$$Y = b_0 + b_1X_{1i} + b_2X_{2i} + \varepsilon_i \quad i = 1, \dots, n \quad \text{nombre d'individus de } Y$$

Où b_0 , b_1 , et b_2 sont les coefficients de la régression (b_1 est associé à la variable X_1 et b_2 est associé à la variable X_2) et ε_i sont les variables aléatoires qui suivent une loi normale de moyenne 0 et d'écart type σ .

Les paramètres b_0 , b_1 , et b_2 sont donnés par la méthode des moindres carrés.

Ici, nous exposons deux exemples présentant les corrélations entre les boues, les corrélations de la FFOM et les corrélations des biodéchets des IAA face à l'ensemble des variables.

III.3.1 Corrélations des boues à l'ensemble des variables

Si, nous reprenons les boues urbaines. Le problème formulé est d'expliquer la variable boues à l'aide des autres variables (hôtel, santé, FFOM, HAU, GMS, déchets verts, restauration collective, commerces de gros et de détails, IAA et effluents). Les données obtenues sont présentées dans Tableau 38. Ce tableau, nous montre l'existence de corrélation entre les boues et :

- La restauration rapide avec une corrélation de 0,845 ;
- La restauration traditionnelle avec une corrélation de 0,829 ;
- La restauration hospitalière avec une corrélation de 0,887 ;
- La restauration scolaire avec une corrélation de 0,762 ;
- Les marchés forains avec une corrélation de 0,862 ;
- Les HAU avec une corrélation de 0,815 ;
- Les GMS avec une corrélation de 0,870 ;
- Les commerces de détails avec une corrélation de 0,765 ;
- Les IAA avec une corrélation de 0,703 ;
- Et la FFOM avec une corrélation de 0,867.

Cette analyse démontre qu'il existe une corrélation positive de ces variables entre elles. Cela signifie que si la production de boues augmente les biodéchets de l'ensemble des autres variables augmentent également et inversement (FFOM, restauration rapide et traditionnelle, restauration hospitalière, marchés forains, GMS et CG et HAU).

Nous supposons que l'origine urbaine de ces déchets les lie entre eux. En effet, la majorité des stations d'épuration de l'île de situent en ville et qui plus est dans les grandes villes comme Saint-Denis, Saint-Pierre, Saint-Benoît, Saint-Paul et le Port qui sont très productrices. Nous supposons que la localisation urbaine présente une diversité élevée des offres et services comme les écoles, les GMS et les restaurants de

tous types. Plus, nous nous éloignons des zones urbaines, plus ces offres et services diminuent.

III.3.2 **Corrélation de la FFOM à l'ensemble des variables**

A l'inverse si on observe la colonne FFOM de la matrice de corrélation, on aura une corrélation entre cette variable et :

- Les boues avec une corrélation de 0,867 ;
- La restauration rapide avec une corrélation de 0,945 ;
- La restauration traditionnelle avec une corrélation de 0,891 ;
- La restauration hospitalière avec une corrélation de 0,889 ;
- La restauration scolaire avec une corrélation de 0,965 ;
- Les marchés forains avec une corrélation de 0,900 ;
- Les HAU avec une corrélation de 0,978 ;
- Les GMS avec une corrélation de 0,953 ;
- Les commerces de détails avec une corrélation de 0,898 ;
- Et les déchets verts avec une corrélation de 0,783.

Ici, il est possible de conclure sur le caractère réciproque des corrélations observées qui se font dans un sens comme l'autre avec des coefficients de corrélations de même ordre de grandeur (entre 0,7 et 0,9).

III.3.3 **Corrélation des biodéchets IAA à l'ensemble des variables**

En poursuivant l'analyse des corrélations, nous remarquons que les IAA présentent des corrélations d'ordre plus petit (0,2 à 0,5 voire -0,1) que précédemment avec :

- La FFOM avec une corrélation de 0,204 ;
- Les déchets verts avec une corrélation de 0,439 ;
- La restauration rapide avec une corrélation de 0,482 ;
- La restauration traditionnelle avec une corrélation de 0,490 ;
- La restauration hospitalière avec une corrélation de 0,612 ;
- La restauration scolaire avec une corrélation de 0,333 ;
- Les marchés forains avec une corrélation de 0,585 ;
- Les HAU avec une corrélation de 0,425 ;
- Les GMS avec une corrélation de 0,534 ;
- Les commerces de détails avec une corrélation de 0,488 ;
- Et les effluents agricoles avec une corrélation négative de -0,182.

Les IAA sont également fortement corrélées avec les commerces de gros à 0,823.

Les IAA sont répartis dans les principaux pôles urbains de l'île à savoir Saint-Denis, le Port, Saint-Pierre et Saint-Benoît. Cependant, les IAA sont regroupées dans des zones

industrielles à part des centres villes. Cette position excentrée fait que les IAA ne sont pas en contact direct avec les autres activités qui s'en trouvent éloignées.

En effet, comme cité ci-dessus les milieux urbains offrent plus de services comme les écoles, les hôpitaux, les marchés, mais ces offres de services sont rarement retrouvées dans les zones industrielles. Nous supposons donc que cette limite géographique engendre une absence de corrélation ou du moins une corrélation moins forte et probante (corrélation allant de 0,1 à 0,5) que celle entre la FFOM et les boues.

D'autres corrélations du même ordre pour les effluents (0 à 0,4) voire même négatives sont observées pour les boues urbaines (-0,137). Et des corrélations plus médianes avec les commerces de gros allant de 0,4 à 0,6 voire -0,133 avec les effluents.

Il est possible alors de conclure sur le fait que les déchets à caractère domestique et urbain sont fortement corrélés entre eux alors et qu'à l'inverse ils sont faiblement corrélés avec les déchets à caractère agricole (effluents) et industriels (IAA et CG). **Cette analyse permet de mettre en évidence un lien entre les flux principalement liés aux types d'activités.**

Les analyses menées jusqu'à présent ont toutes confirmées les observations des analyses précédentes à savoir que les flux sont corrélés entre eux en fonction du type d'activité, du caractère plus urbain ou autre de la commune. Et qu'à ce type, les flux retrouvés au sein des communes sont variables et différents (**hétérogénéité des flux en accord avec l'activité principale de la ville**).

Tableau 39 : Matrice de corrélation entre les variables et les individus

Variables	Effluents	FFOM	DV	Boues	RR	RT	Hôtels	Santé	Scolaire	MF	HAU	GMS	CG	CD	IAA
Avirons	-0,018	-0,147	-0,128	-0,138	-0,123	-0,119	-0,106	-0,131	-0,105	-0,128	-0,145	-0,158	-0,123	-0,195	-0,150
Bras-Panon	-0,038	-0,053	-0,092	-0,097	-0,122	-0,099	-0,118	-0,125	-0,135	-0,098	-0,145	-0,129	-0,135	-0,136	0,306
Cilaos	-0,191	-0,175	-0,197	-0,131	-0,132	-0,100	0,118	-0,131	-0,157	-0,123	-0,165	-0,203	-0,138	-0,161	-0,150
Deux	-0,004	-0,175	-0,152	-0,117	-0,139	-0,123	-0,089	-0,131	-0,153	-0,106	-0,169	-0,203	-0,133	-0,200	-0,142
L'Étang-Salé	-0,135	-0,143	-0,045	-0,058	-0,123	-0,069	-0,077	-0,131	-0,116	-0,128	-0,127	-0,137	-0,082	-0,089	0,054
La Plaine-des-Palmistes	-0,104	-0,196	-0,200	-0,138	-0,142	-0,122	-0,104	-0,131	-0,158	-0,092	-0,173	-0,203	-0,138	-0,191	-0,148
La Possession	-0,004	-0,031	-0,026	-0,138	0,078	-0,034	0,047	-0,108	-0,076	-0,018	-0,016	-0,081	0,240	-0,077	-0,039
Le Port	-0,202	0,013	-0,177	0,255	-0,030	0,012	-0,124	0,049	-0,076	0,180	-0,038	0,122	0,649	-0,030	0,624
Le Tampon	0,809	0,176	0,264	-0,138	0,077	-0,034	0,135	0,054	0,307	0,114	0,180	0,104	-0,106	0,258	-0,092
Les Trois-Bassins	-0,103	-0,173	-0,148	-0,138	-0,138	-0,117	-0,122	-0,131	-0,142	-0,123	-0,162	-0,203	-0,138	-0,153	-0,018
Petite-Île	-0,055	-0,138	-0,098	-0,138	-0,128	-0,120	-0,077	-0,105	-0,128	-0,128	-0,111	-0,135	-0,128	-0,178	-0,151
Saint-André	0,004	0,134	0,032	-0,012	-0,005	-0,030	-0,099	-0,001	0,109	0,083	0,126	0,114	-0,077	0,160	-0,047
Saint-Benoît	0,123	-0,004	-0,024	0,004	-0,042	-0,066	-0,120	0,001	0,003	-0,128	-0,068	0,106	-0,114	0,038	-0,117
Saint-Denis	-0,166	0,734	0,261	0,703	0,836	0,714	0,281	0,567	0,764	0,860	0,699	0,559	0,238	0,448	0,317
Saint-Leu	0,030	-0,058	0,067	-0,075	-0,085	-0,030	-0,034	-0,131	-0,038	-0,035	-0,052	-0,008	-0,111	-0,060	-0,128
Saint-Louis	-0,021	0,122	0,060	0,171	-0,020	-0,100	-0,113	-0,035	0,095	-0,119	0,049	0,147	-0,094	0,080	-0,130
Saint-Paul	0,259	0,296	0,661	0,163	0,249	0,550	0,881	0,349	0,312	0,116	0,435	0,425	0,199	0,313	-0,003
Saint-Pierre	0,066	0,299	0,438	0,464	0,274	0,280	0,045	0,628	0,165	0,229	0,269	0,381	0,470	0,584	0,478
Sainte-Marie	-0,148	-0,048	-0,029	-0,138	0,079	-0,041	-0,115	0,008	-0,091	-0,128	-0,002	-0,023	0,124	0,046	-0,037
Sainte-Rose	-0,202	-0,169	-0,175	-0,114	-0,133	-0,120	-0,072	-0,131	-0,158	-0,128	-0,159	-0,203	-0,133	-0,166	-0,146
Sainte-Suzanne	-0,161	-0,089	-0,101	-0,052	-0,101	-0,115	-0,118	-0,105	-0,086	0,025	-0,069	-0,071	-0,133	-0,098	-0,140
Salazie	0,260	-0,175	-0,193	-0,138	-0,132	-0,116	-0,017	-0,131	-0,138	-0,128	-0,157	-0,203	-0,135	-0,191	-0,140

III.4 Analyse de la variance ou ANOVA

L'ANOVA ou de l'analyse de la variance a pour but de modéliser la relation entre une variable explicative qualitative X à I modalités et une variable à expliquer quantitative Y. L'objectif principal de cette étude est de comparer les moyennes empiriques de Y pour les I modalités de X. Dans ce cas, l'ANOVA peut être considérée comme une extension du test de comparaison de deux moyennes.

Ici la variable X est représentée par les communes et les I modalités sont au nombre des 24 communes (Saint-Denis, Saint-Pierre...). Et La variable Y est représentée par les flux de déchets. Notre analyse revient donc à étudier l'effet du facteur X sur la variable quantitative Y.

Le Tableau 39 des corrélations entre les communes et les flux de déchets montre que certains flux sont effectivement liés à certaines communes (cellules grisées). Nous pouvons donc voir que la commune de Saint-Denis est positivement corrélée avec les boues de STEP, la FFOM, la restauration traditionnelle et rapide, la restauration scolaire, les marchés forains ainsi qu'avec les HAU. Saint-Denis constitue la capitale de la Réunion, elle propose donc un choix élevé en restaurants de tous genres et possède également plus de 73 écoles soit 16% de la totalité des écoles de l'île. Toutes ces activités engendrent inévitablement une production accrue de boues de STEP et FFOM.

Par ailleurs et à juste titre la commune du Port est corrélée avec le flux commerces de gros et les IAA et que la commune du Tampon est corrélée au flux des effluents. Comme, nous l'avons vu dans le titre II, ces liens se justifient respectivement par le caractère industriel et agricole fortement prononcés de ces communes.

Et pour finir, Saint-Paul est lié positivement à la restauration hôtelière. En effet, Saint-Paul recense plus de 45 établissements de tourisme soit 35% de la production totale de déchets organiques issus des établissements hôteliers de la Réunion.

Cette analyse de la variance permet de confirmer et de valider les conclusions précédentes à savoir que **le caractère urbain ou rural d'une commune ainsi que son type d'activité économique sont fortement liés à la présence ou non de certains types de déchets**. Nous pouvons alors associer ces conclusions à une célèbre citation détournée à la guise du contexte ici : « *Dis-moi ce que tu jettes et je te dirais ce que tu es* » (dérivé de la citation de Cervantès dans l'œuvre de Don Quichotte, II, X (1615)).

III.5 Analyse en Composantes Principales (ACP)

Une Analyse en Composantes Principales est utilisée pour résumer un tableau de données constitué de X individus et de Y variables (réduction des dimensions). L'ACP permet d'étudier les ressemblances entre individus (les communes) du point de vue de l'ensemble des variables (les flux de biodéchets) et ainsi de mettre en exergue des **profils d'individus**. Elle permet également de réaliser un bilan des liaisons linéaires entre variables à partir des coefficients de corrélations. Ces études étant menées dans un même cadre, elles peuvent être reliées, ce qui permet de **caractériser les individus ou groupes d'individus par les variables, mais aussi d'illustrer les liaisons entre variables à partir d'individus caractéristiques**.

Jusqu'à présent, les analyses ont exposé les relations existantes entre variables et non entre individus. C'est en cela que l'ACP est utile, elle favorise l'étude des corrélations entre individus mais reprend également l'ensemble des résultats et observations menées précédemment. L'ACP est un outil d'analyse statistique permettant la comparaison à la fois des variables entre elles, des individus entre eux et de croiser les variables et les individus entre eux. Cet outil permet la synthèse d'un jeu de données à x dimensions.

Le jeu de données est le même, il est constitué de 24 individus : les communes, et de 15 variables : les flux de déchets. L'objectif de l'ACP sur ce jeu de données est de déterminer des profils d'individus similaires. Cette analyse permet de répondre à un certain nombre d'interrogations comme : y-a-t-il des communes très productrices de déchets (qui se démarquent) ou inversement ? Quels sont les flux les plus abondants ? Existe-t-il des flux similaires en termes de distribution ? Une commune produit-elle un type de déchet qu'un autre ?...

L'interprétation de ces données sous forme de tableau ne permet pas de visualiser le résultat final des corrélations existantes entre les flux de déchets et les communes. C'est pourquoi, nous avons jugé nécessaire de réaliser une analyse en composantes principales qui propose un rendu graphique et ainsi une observation plus probante de la base de données.

III.5.1 Choix des variables et des individus actifs

Pour la construction des axes de l'ACP toutes les variables (flux de déchets) ont été considérées. En effet, pour la construction des axes, il est nécessaire de calculer les distances entre individus (les communes) et variables (flux). Autrement dit, toutes les données sur les flux de déchets sont prises en compte pour calculer les distances entre individus. De même tous les individus (communes) sont considérés comme actifs.

III.5.1.1 Standardiser les variables

Lors d'une ACP, deux méthodes s'offre à nous pour standardiser les variables dans un but de les rendre comparables :

- Soit les réduire, si les variables ont des unités ou des ordres de grandeurs différents,
- Soit les centrer et les réduire,

Dans notre cas, les variables sont de même unité, par conséquent les deux solutions sont envisageables. Ici, nous avons fait le choix de centrer et réduire à fin d'accorder la même importance à chacune des variables.

III.5.1 Choisir le nombre d'axes

Plusieurs solutions existent pour déterminer le nombre d'axes à analyser en ACP. La plus courante consiste à représenter le diagramme en barres des valeurs propres ou d'inerties associées à chaque axe (Figure 110).

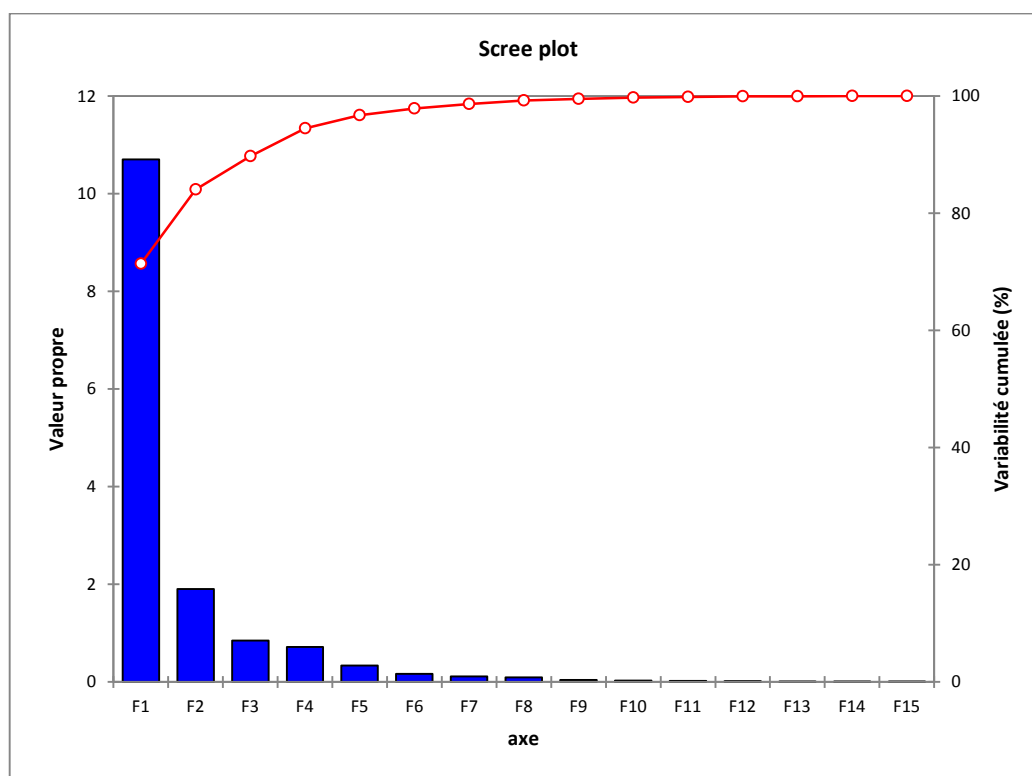


Figure 110 : Diagramme des valeurs propres

Il faut chercher alors une décroissance ou une cassure apparente sur le diagramme en bâtons. Ici les 4 premières dimensions peuvent être analysées. En effet, après le premier axe et le deuxième axe, cette décroissance des inerties est observée. Elle devient plus régulière pour les axes suivants.

Le pourcentage d'inertie expliqué par les N premiers axes est donné dans le Tableau 40.

Tableau 40 : Les pourcentages d'inertie des 5 premiers axes

	F1	F2	F3	F4	F5
Valeur propre	10,702	1,906	0,849	0,716	0,334
Variabilité (%)	71,348	12,706	5,661	4,776	2,228
% cumulé	71,348	84,054	89,715	94,491	96,720

L'axe 1 explique 71,35% des données et l'axe 2 explique 12,70% des données. Ces deux axes expriment donc plus de 84% de l'inertie totale, c'est-à-dire que 84% de l'information du tableau de données est contenue dans les deux premières dimensions. Cela signifie que la diversité des profils peut être expliquée par deux dimensions à plus de 80%. Dans ce cas, une interprétation sur deux dimensions suffit pour avoir une bonne représentativité de notre étude.

III.5.2 Analyse des résultats

Pour interpréter les résultats d'une ACP, l'étude simultanée des résultats des individus (communes) et des variables (flux de déchets) est réalisée. En effet, nous voulons caractériser les différents profils des communes à partir des flux de déchets.

L'analyse sur XLSTAT présente le graphique des individus (communes) sur le plan principal (Figure 111) et le graphique des variables (flux) sur les deux premières dimensions (Figure 112) (cf. graphiques des inerties).

Sur la Figure 111, nous posons comme hypothèse que l'axe 1 représente les flux de déchets et que l'axe 2 représente les quantités de déchets. Saint-Denis, Saint-Pierre et Saint-Paul constituent des communes très productrices. Saint-Pierre et Saint-Denis semblent productrices en tous types déchets d'où leurs positions plus ou moins centrales, sur l'axe 2. Saint-Paul est déjà plus spécialisée en termes de types de déchets produits, au même titre que la commune du Port, le Tampon et Saint-Joseph. De plus, Le Tampon, Saint-Joseph et Saint-Paul présentent une production de déchets totalement différente. De ce fait, le long de l'axe 1, nous allons observer **une répartition des communes selon leur flux de production, plus de type agricole en haut de l'axe à un type plus urbain à industriel en bas de l'axe**.

III.5.2.1 Observations des individus

Les communes comme Saint-André, Saint-Louis et Sainte-Suzanne possèdent une composition en déchets équilibrée, c'est-à-dire qu'elles produisent dans des proportions similaires chaque flux de déchets étudiés (alignement sur l'axe 2). Les communes les moins productrices (à gauche sur l'axe 2) sont Cilaos, les Avirons, et la Plaine des palmistes... mais toujours productrices à part « égales » des différents flux. Et les communes les plus spécialisées dans un type de flux se situent aux extrémités de l'axe 1.

La Figure 111 montre également des regroupements de communes comme Petite-Île, les Avirons, Bras-Panon, l'Entre-Deux, la Plaines des Palmistes, Cilaos ou encore l'Etang-Salé... Ces groupements démontrent que ces communes ont des comportements similaires en termes de quantités produites et en composition de déchets (les mêmes flux). Cette observation suppose que ces communes pourraient supporter un même type de scénario de gestion des déchets. Un scénario établi pour la commune des Avirons pourrait convenir ou s'adapter à la commune de l'Entre-Deux puisque leur comportement en terme de qualité et de quantité sont proches.

Dans l'ensemble le premier axe oppose **des profils de communes selon leur composition en déchets**. La commune de Le Tampon ne produit pas les mêmes flux de déchets que le port et inversement. Par contre, elles auraient une production totale de déchets (quantité) plus ou moins similaire (même alignement sur l'axe 2). Au regard de la Figure 111, la commune de la Plaine des Palmistes serait la moins productrice tandis que Saint-Denis serait la plus productrice de déchets.

III.5.2.2 *Observation des variables*

L'ACP des flux de déchets (Figure 112) expose sur l'axe 2 que les variables GMS et FFOM sont corrélées positivement. Cela signifie que plus une commune produit de déchets de GMS plus elle produit de déchets de FFOM. L'inverse est également vérifié. Par contre, il semblerait que plus les communes produisent de déchets de GMS, scolaires et de FFOM moins elles produisent de déchets de restauration hospitalière, de restauration rapide et de marchés forains. De même pour les commerces de gros et de détails, ces données sont corrélées négativement, de ce fait, plus il y aura de production au niveau des commerces de gros moins il y aura de production au niveau des commerces de détails.

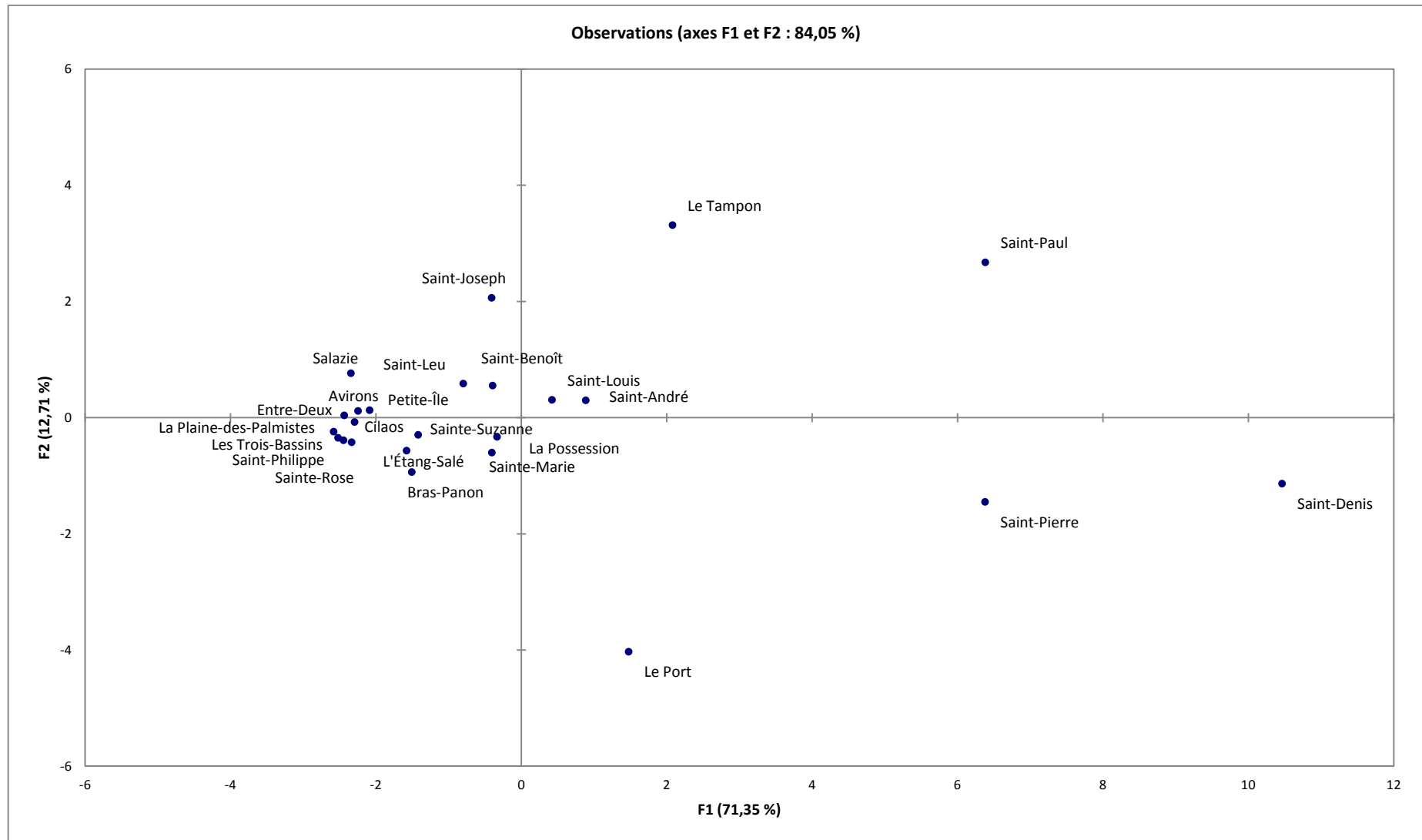
L'axe 1 est quant à lui décrit par les effluents agricoles qui sont fortement corrélés positivement (quasi alignement sur l'axe 1).

On sait que la première composante principale est la combinaison linéaire des variables qui synthétisent au mieux l'ensemble des variables. Dans notre étude la synthèse automatique fournie par l'ACP coïncide presque avec les déchets la FFOM, GMS et RT pour l'axe 2 et d'ordre moins important avec les effluents pour l'axe 1.

Nous émettons comme hypothèse que l'axe 1 présente principalement les flux à caractère ménagers, domestiques (FFOM, restauration collective) et d'un ordre moins important un caractère industriel (commerces de gros et IAA) liés aux activités anthropiques tandis que l'axe 2 représente un flux à caractère plus rural liés aux activités agricoles.

La distribution des données montre que l'axe 1 est représenté par la restauration du secteur de la santé, la restauration scolaire, les boues de STEP, la FFOM, les GMS, et de détails et la restauration rapide et traditionnelle à hauteur d'environ 7 à 8% par flux et d'environ 3% pour les flux industriels (CG et IAA). A l'inverse, l'axe 2 représente les effluents (31,51%). Soit une représentativité totale de 74,07%

Ces interprétations peuvent être affinées à l'aide des résultats numériques.



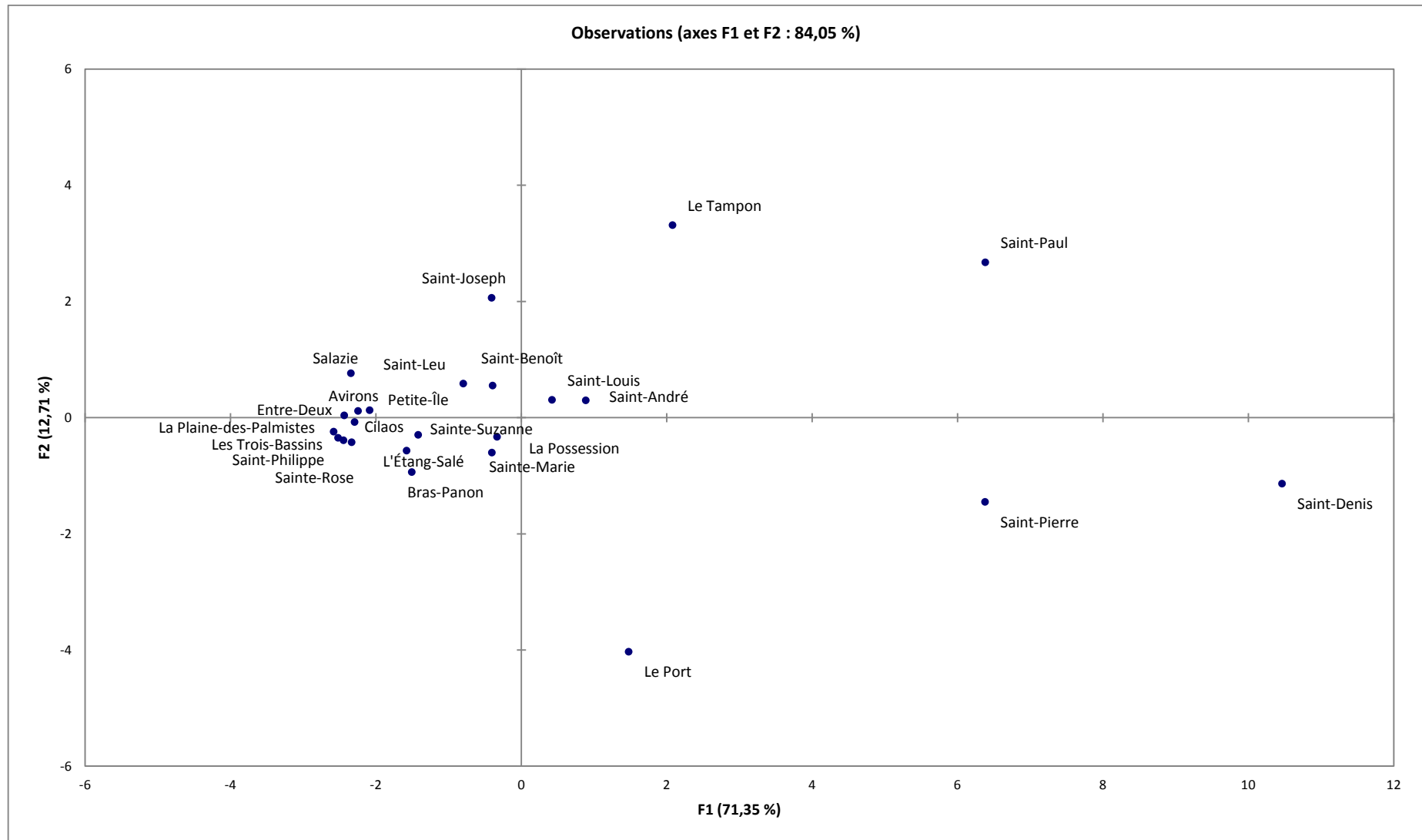


Figure 111 : Graphique des individus (communes)

Figure 112 : graphique des variables (flux de déche

III.5.3 Résultats Numériques

Sur XLSTAT, nous obtenons une liste des coordonnées des individus (communes) sur les axes 1 et 2 présentées dans le Tableau 41. Ce logiciel, nous fournit également des informations sur les cosinus carrés, qui mesurent la qualité de la projection des individus sur les axes et permettent d'interpréter les proximités entre eux, et leurs contributions pour la construction des axes.

Tableau 41 : Données numériques des coordonnées, des contributions et des cosinus obtenus pour les individus

Observation	Coordonnées		Contributions (%)		Cosinus carrés	
	F1	F2	F1	F2	F1	F2
Avirons	-2,243	0,117	1,959	0,030	0,961	0,003
Bras-Panon	-1,506	-0,936	0,883	1,914	0,395	0,152
Entre-Deux	-2,433	0,040	2,304	0,004	0,957	0,000
L'Étang-Salé	-1,578	-0,569	0,970	0,708	0,743	0,097
Petite-Île	-2,084	0,127	1,692	0,035	0,945	0,004
La Plaine-des-Palmistes	-2,578	-0,243	2,588	0,130	0,933	0,008
Le Port	1,479	-4,030	0,852	35,499	0,093	0,693
La Possession	-0,332	-0,330	0,043	0,238	0,042	0,041
Saint-André	0,889	0,298	0,308	0,194	0,303	0,034
Saint-Benoît	-0,393	0,550	0,060	0,661	0,085	0,167
Saint-Denis	10,464	-1,138	42,626	2,830	0,918	0,011
Saint-Joseph	-0,408	2,063	0,065	9,307	0,022	0,575
Saint-Leu	-0,796	0,584	0,246	0,745	0,438	0,236
Saint-Louis	0,424	0,304	0,070	0,202	0,053	0,027
Saint-Paul	6,383	2,674	15,862	15,627	0,713	0,125
Saint-Pierre	6,380	-1,450	15,850	4,599	0,826	0,043
Saint-Philippe	-2,519	-0,349	2,471	0,266	0,891	0,017
Sainte-Marie	-0,403	-0,604	0,063	0,797	0,070	0,158
Sainte-Rose	-2,444	-0,389	2,326	0,331	0,877	0,022
Sainte-Suzanne	-1,417	-0,296	0,782	0,191	0,647	0,028
Salazie	-2,341	0,765	2,134	1,278	0,758	0,081
Le Tampon	2,080	3,314	1,684	24,006	0,221	0,561
Les Trois-Bassins	-2,332	-0,425	2,117	0,395	0,929	0,031
Cilaos	-2,293	-0,077	2,046	0,013	0,728	0,001

Le Tableau 42 fournit les mêmes résultats pour les variables : les coordonnées, les qualités de représentation et les contributions des variables (%). Il est toujours essentiel de revenir des résultats chiffrés afin de s'assurer de la fiabilité des interprétations. En observant, ces données numériques, les conclusions exploitées graphiquement se trouvent être confirmées par l'analyse numérique.

Tableau 42 : Données numériques des coordonnées, des contributions et des cosinus carré pour les variables

	Coordonnées		Contributions (%)		Cosinus carrés	
	F1	F2	F1	F2	F1	F2
Effluents	0,181	0,775	0,305	31,515	0,033	0,601
FFOM	0,972	0,049	8,833	0,128	0,945	0,002
DV	0,836	0,389	6,529	7,947	0,699	0,151
Boues	0,890	-0,353	7,404	6,527	0,792	0,124
RR	0,942	-0,050	8,287	0,129	0,887	0,002
RT	0,945	0,011	8,345	0,006	0,893	0,000
Hôtels	0,651	0,426	3,964	9,523	0,424	0,181
Santé	0,952	-0,081	8,469	0,342	0,906	0,007
Scolaire	0,920	0,238	7,906	2,968	0,846	0,057
MF	0,891	-0,186	7,419	1,811	0,794	0,035
HAU	0,976	0,136	8,896	0,968	0,952	0,018
GMS	0,966	0,039	8,722	0,082	0,933	0,002
CG	0,649	-0,530	3,930	14,730	0,421	0,281
CD	0,916	0,146	7,841	1,120	0,839	0,021
IAA	0,581	-0,651	3,152	22,205	0,337	0,423

Les principales dimensions de variabilité :

XLSTAT permet de décrire automatiquement les axes de l'ACP, ce qui peut constituer une nouvelle aide à l'interprétation. XLSTAT favorise le tri des variables quantitatives (les déchets) en fonction de leur coordonnée sur un axe c'est-à-dire selon le coefficient de corrélation entre la variable et la composante de l'ACP. Seuls les coefficients de corrélation les plus significatifs sont conservés (Tableau 43). D'après les calculs toutes les p-value sont très inférieures à 5%, l'hypothèse H_0 d'indépendance est donc rejetée.

On remarque que le 1er axe est surtout lié aux variables FFOM (0,972), déchets verts (0,836), boues (0,890), restauration rapide (0,942), restauration traditionnelle (0,945), santé (0,952), scolaires (0,920), marchés forains (0,891), HAU (0,976), GMS (0,966) et commerces de détails (0,916). Tandis que le 2ème axe est principalement décrit par les variables effluents (0,775) et les IAA (-0,651), le niveau de confiance du test étant de 95%.

Tableau 43 : Corrélations entre les variables et les facteurs

	F1	F2
Effluents	0,181	0,775
FFOM	0,972	0,049
DV	0,836	0,389
Boues	0,890	-0,353
RR	0,942	-0,050
RT	0,945	0,011
Hôtels	0,651	0,426
Santé	0,952	-0,081
Scolaire	0,920	0,238
MF	0,891	-0,186
HAU	0,976	0,136
GMS	0,966	0,039
CG	0,649	-0,530
CD	0,916	0,146
IAA	0,581	-0,651

IV. Conclusion

En conclusion, nous pouvons dire que cette étude nous a effectivement permis de répondre à nos interrogations, à savoir :

- Nous avons mis en exergue des corrélations entre flux (FFOM et boues) mais également des corrélations entre flux et communes (IAA et Le Port) ;
- Ces corrélations sont dues aux caractères urbains, industriels voire agricoles des communes ;
- Et enfin, nous avons pu identifier des groupes de communes présentant les mêmes typologies en termes de qualité (type de flux) que de quantité. Ces groupes sont au nombre de 5 et sont présentés dans le Tableau 44.

Ce chapitre, nous a permis de mettre en exergue un certain nombre d'informations concernant le gisement de biodéchets à la Réunion. Nous avons pu au travers de différentes méthodes de quantification élaborer une base de données très complète sur les tonnages de biodéchets existants. Afin de pousser cette approche, il serait intéressant d'estimer nos propres ratios de production par la mise en œuvre d'enquêtes publiques. De plus, la mise à disposition de données telles que les potentiels méthanogènes serait très utile pour la réalisation d'autres enquêtes ou campagnes de types MOEDCOM. En effet, beaucoup de laboratoires de recherches publics ou privés travaillent à ce sujet. La mutualisation de ces données via une plateforme multimédia permettrait de développer sur le territoire de telles enquêtes dans un but de toujours maîtriser l'information, d'observer les évolutions et ainsi de proposer des actions adaptées.

Outre la difficulté de collecte des données, l'analyse par ACP de la base a permis de révéler un point capital dans la mise en place de scénarios de gestion des déchets. La gestion jusque-là territoriale, pourrait s'appuyer sur les résultats de typologies

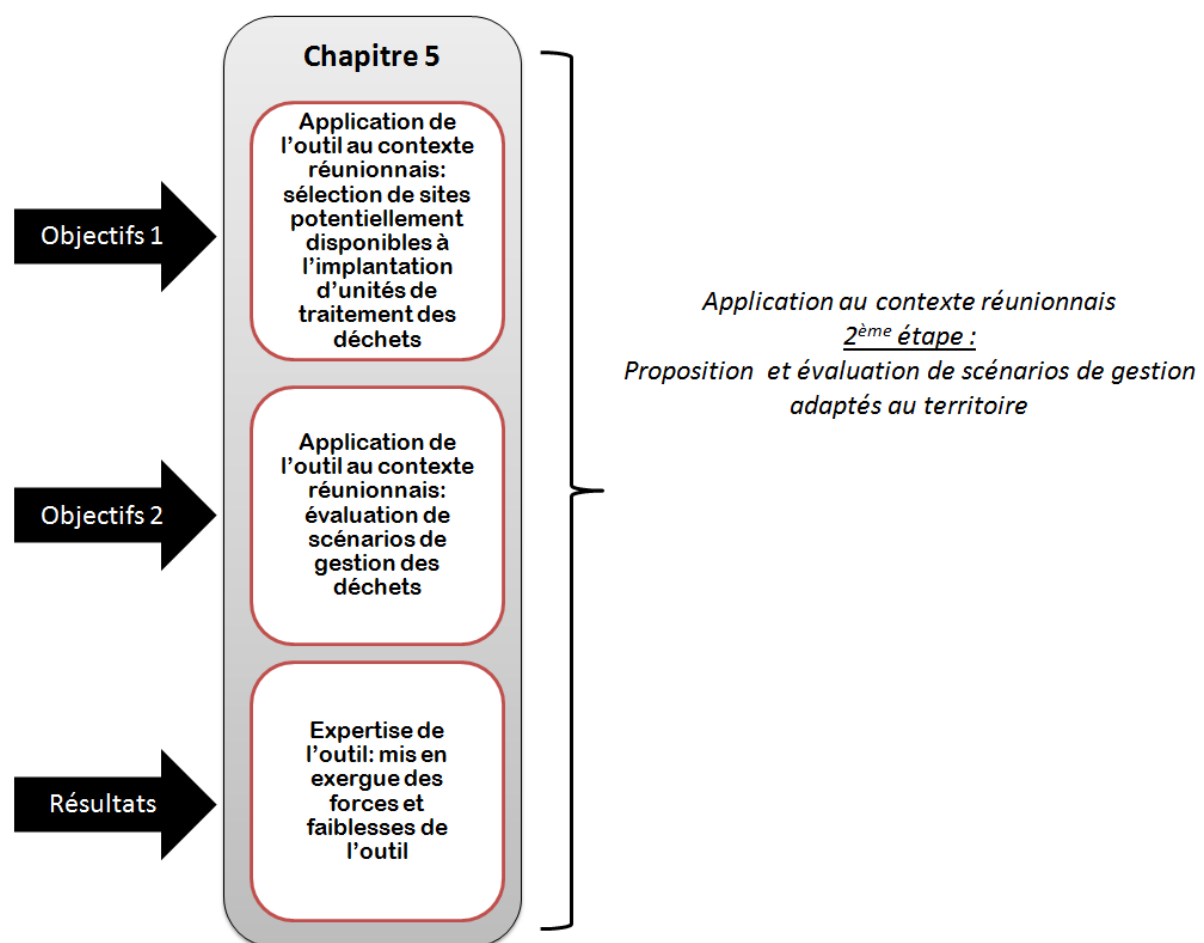
obtenus afin de proposer des systèmes de gestion à plus petite échelle, par exemple à celle de la commune ou groupement de deux ou trois communes côte à côte présentant des profils similaires. Cela faciliterait le développement d'installations par EPCI adaptées au gisement présent au niveau des communes ainsi que leur mise en commun. L'optimisation des coûts de gestion et notamment de transport peuvent être réduite par l'appréhension de cette approche. D'autres facteurs sont à considérer comme la sensibilisation des citoyens, qui du fait d'une gestion à plus petite échelle, seront plus au fait des actions menées au sein de leurs communes et pourront s'approprier cette gestion jusque-là trop vaste pour être comprise dans son ensemble. Au vu de ces constats, la gestion des biodéchets est un atout majeur pour l'île à considérer concrètement dans l'actuelle chaîne de gestion. En effet, les biodéchets constituent un facteur non négligeable s'insérant pleinement dans le mix énergétique et dans l'objectif en permettant d'atteindre l'autonomie énergétique d'ici 2035.

Maintenant que le gisement est identifié, analysé et interprété, le chapitre suivant vise à proposer des sites d'implantation d'unités de traitement dans une première partie et à élaborer des scénarios, à l'aide à la fois de notre outil de simulation et d'un logiciel visual PROMETHEE afin de comparer les résultats théoriques de notre approche à celle d'un logiciel ayant fait ces preuves. La finalité est de pouvoir avoir un panel de scénarios adaptés à chacun des besoins identifiés et ainsi faciliter l'aide à la décision.

Tableau 44 : Récapitulatif des groupements de communes

Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3	Groupe 4	Groupe 5
Saint-Denis	Le Tampon	Le Port	Salazie	Saint-Benoît
Saint-Paul	Saint-Joseph		Petite-Ile	Saint-Leu
Saint-Pierre			Les Avirons	Cilaos
			Entre-Deux	Bras-Panon
			Saint-Philippe	Saint-Louis
			Sainte-Rose	L'Etang-Salé
			Les Trois-Bassins	La Possession
			La Plaine des Palmistes	Sainte-Marie
			Sainte-Suzanne	Saint-André

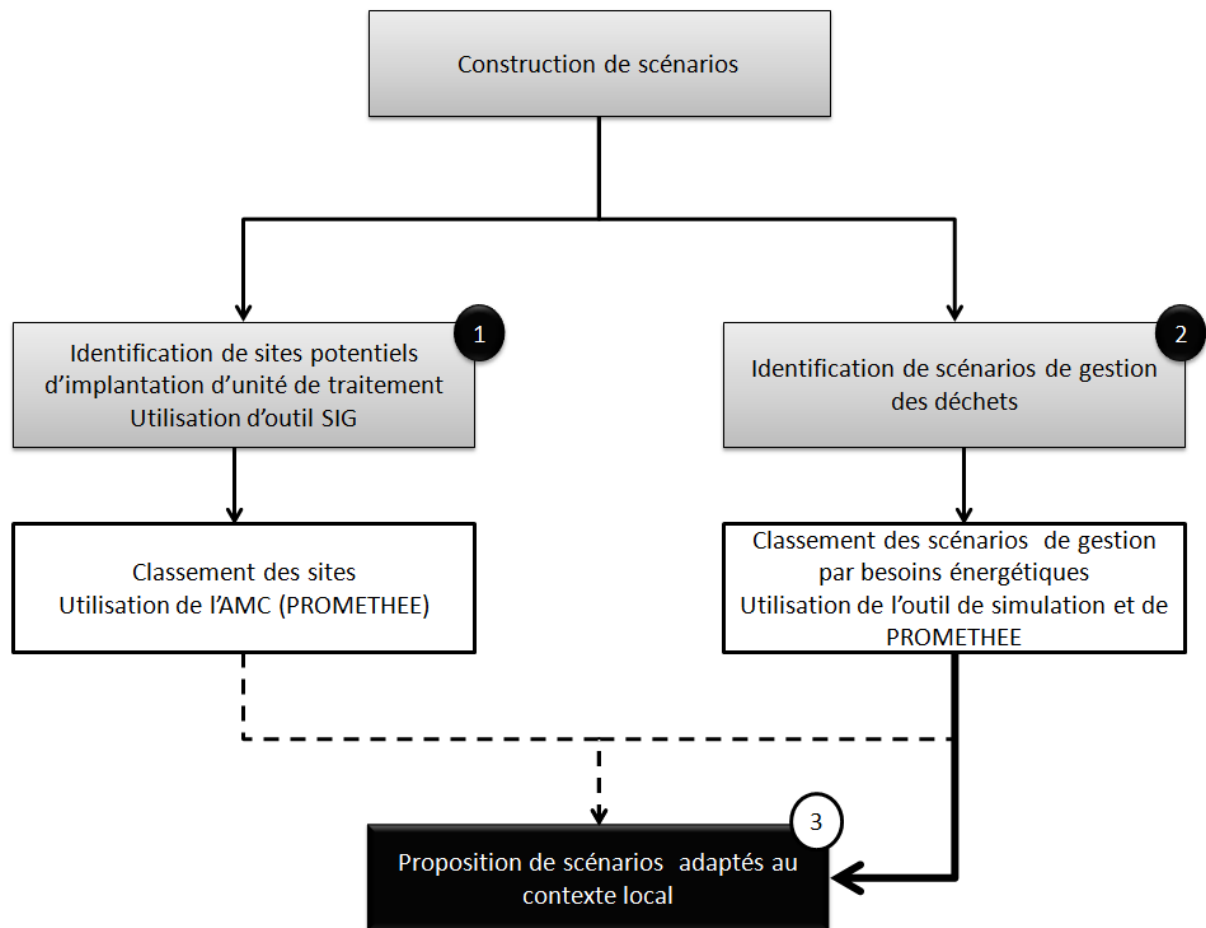
Chapitre 5 : Analyse des sites potentiels et proposition de scénarios de gestion des déchets



Sommaire

Sommaire.....	307
I. Introduction du chapitre.....	310
II. Recherche de sites potentiels d’implantation d’unité de traitement : Mise en œuvre d’une AMC.....	311
II.1 La sélection de sites potentiels d’implantation	312
II.2 Calibrage des paramètres : Acquisition de données	313
II.2.1 Présentation des critères	313
II.2.2 Présentation du tableau des performances.....	316
II.2.2.1 Les critères environnementaux	316
II.2.2.2 Les critères économiques : C9 et C10.....	317
II.2.3 Pondération des critères pour l’évaluation des sites potentiels	317
II.3 Proposition de sites potentiels d’implantation.....	318
III. Sélection et évaluation des scénarios retenus.....	328
III.1 Sélection des scénarios de gestion des déchets	328
III.1.1 Les hypothèses de base.....	330
III.1.1.1 La FFOM.....	330
III.1.1.2 Les déchets verts	330
III.1.1.3 Les boues de STEP.....	331
III.1.1.4 Les effluents agricoles.....	331
III.1.1.5 Les biodéchets d’IAA	332
III.1.1.6 Les biodéchets organiques des GMS et des commerces alimentaires	332
III.1.1.7 Les biodéchets de la restauration collective et des marchés forains	332
III.1.1.8 Projection autour des hypothèses de base.....	332
III.1.2 Construction des scénarios	334
III.1.2.1 Les options de collecte	336
III.1.2.2 Les options de prétraitement et de tri.....	336
III.1.2.3 Les options de traitement des déchets primaires et des produits induits	338
III.1.3 Présentation des scénarios	342
III.1.4 Les scénarios retenus pour l’AMC	344
III.1.4.1 Les scénarii de valorisation en électricité	344
III.1.4.2 Les scénarii de valorisation en carburant.....	347
III.2 Calibrage des paramètres : Acquisition des données.....	351

III.2.1	Présentation des critères	351
III.2.2	Présentation du tableau des performances	353
III.2.2.1	Les critères environnementaux : C1 et C2 : Les émissions de GES 353	
III.2.2.2	C3, C4 et C5 : Les nuisances	354
III.2.2.3	Les critères économiques : C6, C7, C8 et C9 :	357
III.2.2.4	Les critères sociaux : C10, C11 et C12	358
III.2.2.5	Les critères technologiques de C12 à C15	359
III.2.3	Pondération des critères pour l'évaluation des scénarios	361
III.2.4	Proposition de scénarios de gestion au travers du logiciel Visual PROMETHEE	362
III.2.4.1	Interprétation des classements au regard des scénarios	365
III.2.4.2	Discussion des classements obtenus	367
IV.	Conclusion	369



Légende:

- - ➔ Version idéale faisant l'objet d'une publication en cours de rédaction non présentée dans le manuscrit
- ➔ Version exposée dans le manuscrit

Figure 113 : Présentation de l'approche utilisée (source : HATIK, 2015)

I. Introduction du chapitre

Pour cerner les deux principaux objectifs de ce chapitre, le classement des sites des traitements des déchets et des scénarios de gestion et de traitement des déchets, nous feront appel, comme exposé au chapitre 1 à la démarche statistique s'appuyant sur l'Analyse Multi Critères (AMC).

Comme nous l'avions souligné dans le premier chapitre, l'AMC est utilisée pour permettre le classement de plusieurs alternatives de la plus favorable à la moins favorable et ainsi d'identifier les options les plus adaptées au problème posé. Dans notre cas, nous allons donc procéder en deux étapes. La première consiste à identifier les sites favorables à l'implantation d'une unité de traitement (classement des sites) et la deuxième de choisir l'alternative de gestion des déchets la plus optimale ; L'idéal aurait été d'identifier pour chacun des sites favorables, les scénarios de gestion adaptés. Ce point est par conséquent à considérer dans les perspectives de l'étude (Figure 113).

Au-delà de l'identification des critères, ces choix peuvent aussi s'appuyer sur des réalisations d'objectifs et des mises en œuvre de stratégies, qu'il nous faudra éventuellement cerner et clairement identifier.

Dans un projet de gestion des déchets, il est important de localiser les zones productrices, mais dans un contexte d'insularité les zones productrices ne sont pas forcément aptes à accueillir des unités de traitements face aux contraintes urbaines. C'est pourquoi, nous avons choisi de proposer une méthodologie afin d'extraire les sites potentiellement aptes et répondant aux contraintes juridiques. Nous les croisons ensuite avec les zones productrices. Nous proposons ensuite une AMC afin de classer les sites favorables et aussi de mettre en place des scénarios de gestion adaptés au contexte des sites considérés. Une fois les sites classés, nous effectuons une deuxième AMC afin de ranger les scénarios par site. Comme précisé en amont, cette combinaison des deux approches, sites et scénarios de gestion, ne pourra être présentée dans le manuscrit par manque de recul et de temps. Mais fera l'objet de perspectives afin d'affiner l'aide à la décision ainsi qu'une publication. De ce fait, nous présentons les sites potentiels dans une première partie et les scénarios possibles à l'échelle de l'île dans un deuxième temps.

En conclusion, nous obtenons pour un certain nombre de sites retenus, un classement de scénarios de gestion des déchets. Il sera alors possible de prendre une décision face aux besoins des acteurs.

Dans l'idéal, l'objectif consiste à choisir parmi plusieurs sites potentiels les meilleures options et à proposer pour chacune de ces options les meilleurs scénarios de gestion en accord avec la productivité et la composition des flux dans un périmètre défini autour du site considéré. Concrètement, selon les remarques effectuées, nous considérons séparément les approches d'identification des sites et des scénarios, permettant toutefois, une analyse poussée du territoire et des alternatives possibles.

II. Recherche de sites potentiels d'implantation d'unité de traitement : Mise en œuvre d'une AMC

La recherche de sites potentiels constitue la première étape de la méthode élaborée. Pour cela, nous avons procédé en plusieurs étapes :

- Une étape d'élimination où nous avons soustrait de la carte de l'île toutes les zones dites d'exclusion et par conséquent, non aptes à accueillir des unités de traitement. A l'issue de cette étape, nous obtenons un certain nombre de sites qui doivent être affinés ;
- Une étape d'affinage où nous avons établi des zones tampons conformément à la réglementation et attribué à chaque paramètre d'évaluation une valeur permettant à l'élaboration du tableau de performance ;
- Une étape d'appréciation qui consiste à observer, en conditions réelles, et grâce à l'utilisation d'une photo satellite, les sites potentiels.

La Figure 114 résume la démarche dans son ensemble.

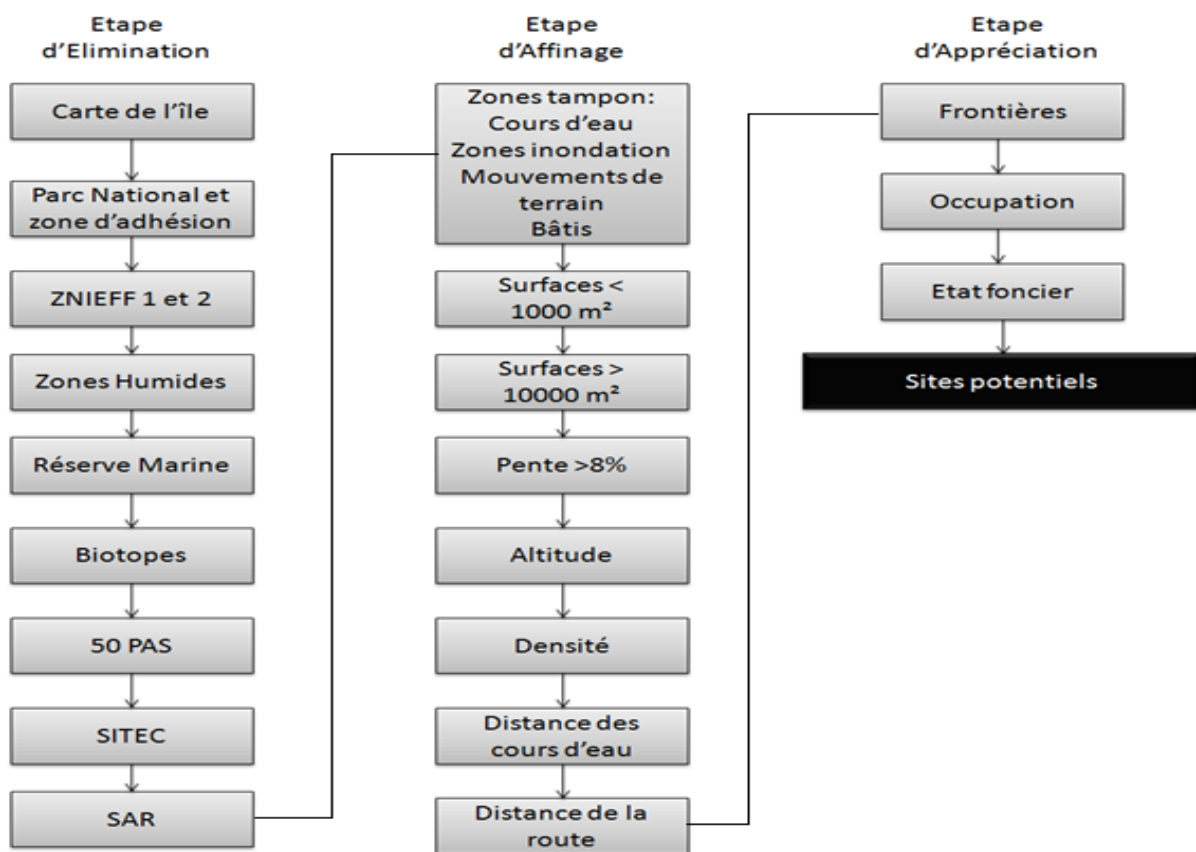


Figure 114 : Synthèse de la méthode d'obtention des sites potentiels

II.1 La sélection de sites potentiels d'implantation

Nous avons élaboré et mis en œuvre une méthode afin de déterminer les sites les plus favorables à l'implantation d'unité de traitement des déchets basée sur l'analyse multicritères. Cette méthode comprend deux phases. La première étape consiste à proposer une méthode d'identification des sites propices à l'installation d'unité de traitement des déchets. Quelle zone est susceptible de devenir un site de gestion des déchets ? Cette étape nécessite plusieurs recherches préalables à savoir la connaissance des contraintes d'implantation d'ICPE. Et la deuxième, le classement des sites identifiés du plus favorable au moins favorable par une analyse multicritères. Nous avons donc une phase d'identification suivie d'une phase de classement.

Pour l'identification des zones potentielles, nous procédons selon une approche dite par « élimination ». Cette approche permet l'identification des zones d'exclusions. Les zones d'exclusions sont tous les terrains ne permettant pas l'implantation d'une unité de traitement des déchets. La question est « quels sont les zones ou terrains susceptibles d'accueillir une unité de traitement des déchets ? ». De ce fait, nous avons opté de procéder par une approche inverse et donc d'élimination : quelles sont les zones non disponibles pour une telle activité afin d'obtenir au final une cartographie des sites disponibles potentiellement. Cette procédure est réalisée via une analyse SIG et est par conséquent purement cartographique.

Afin de mener à bien cette analyse cartographique selon une approche par élimination, une bonne connaissance des contraintes d'urbanisme sont nécessaires. En partant, d'une représentation de l'île, nous avons déduit toutes les surfaces déjà occupées comme les espaces bâtis et protégés. Nous avons également considéré les zones dites hydrauliques comme les rivières, nappes souterraines, zones d'inondations ainsi que les pentes de plus de 20% qui ne permettent pas la construction d'un tel édifice. En plus de ces limites administratives, des périmètres de sécurité imposés par réglementation doivent être intégrés. Ces périmètres se traduisent par des zones tampon autour des sites potentiels ou encore des habitations. Le détail des textes et des données utilisés sont présentés en annexe 16. Il est important de préciser que ce travail fut de longue durée au vu des données à traiter et du contrôle à mettre en œuvre après chaque exclusion de zones. Un gros travail de sélection graduelle a aussi été nécessaire afin de vérifier un à un les sites obtenus par vue satellite afin d'affiner les résultats obtenus. L'analyse cartographique est un point crucial dans une démarche de proposition de scénarios de gestion des déchets dans un objectif d'aide à la décision et fut une étape très chronophage. Bien que cette partie ne soit pas très développée, il est important de souligner le temps consacré à sa réalisation, tant dans la phase d'acquisition des données SIG de base, que dans la phase de vérification et le contrôle des données finales.

Une fois, l'analyse cartographique effectuée, nous devons réaliser le classement des sites retenus à l'aide d'une AMC. Nous pouvons considérer cette étape comme une étape de caractérisation. En effet, toute une procédure d'acquisition de données autour des sites potentiels a été nécessaire afin de constituer le tableau de performance. Le tableau de performance se présente comme une matrice avec, en

colonnes, les critères identifiés et en les lignes, les alternatives possibles à savoir les sites potentiels. L'acquisition de données s'attache donc à remplir cette matrice en caractérisant pour chacun des critères les valeurs propres aux sites.

Cette étape nous servira de base afin d'identifier les scénarios les plus adaptés à l'espace géographique. En effet, l'analyse spatiale de la base de données (cf. chapitre III), nous a permis d'identifier les différents flux présents sur l'île. Nous savons donc que pour une zone donnée, nous avons une quantité globale des déchets composée de tel de flux. En se basant, sur cette typologie des flux pour la zone d'implantation, il devient alors possible de proposer un certain nombre de scénarios. L'objectif est de pouvoir proposer des scénarios par sites potentiels en tenant compte des flux et gisements présents dans le périmètre du site. Les scénarios seront donc adaptés au contexte de la zone d'implantation et du gisement dans un périmètre déterminé.

Les sites retenus sont au nombre 133.

II.2 Calibrage des paramètres : Acquisition de données

II.2.1 Présentation des critères

Comme précisé pour la réalisation d'une AMC, un tableau des performances est nécessaire. C'est dans ce tableau que sont rentrées toutes les données des sites selon les critères identifiés. Pour le classement des sites, nous avons identifiés 10 critères. Pour ce choix de critères, nous nous sommes appuyés sur plusieurs études ciblant les paramètres les plus pertinents dans l'aménagement de sites de gestion des déchets (Chabaane et al ; 2002, Dorsal et al ; 2002 et Achillas ; 2010). Notre étude ne porte pas sur l'aménagement d'un site en particulier ou ne traite pas d'un projet d'aménagement défini, pouvant faire l'objet d'une concertation entre les différents acteurs concernés. De ce fait, nous avons souhaité établir nos critères, le plus justement possible en s'appuyant sur les trois piliers fondamentaux à savoir économique, social et environnemental dans toute démarche d'aménagement durable.

Nous avons donc effectué un croisement des critères redondants pour ainsi mettre en place une sélection de critères. Les critères sont définis comme suit:

1. La superficie : Dans tout projet d'aménagement, il est important de considérer la taille du terrain, si celui est trop petit, il ne pourra pas être conservé. Nous avons sélectionné une superficie minimale de 10000 m². Plus la superficie est grande plus l'alternative sera préférée.
2. Frontières du terrain : les frontières du terrain sont observées afin de déterminer la forme géométrique du terrain, plus celle-ci est complexe plus l'aménagement le sera également, la présence de routes et chemins traversant le terrain... Toutes les caractéristiques physiques du terrain sont analysées pour cela une binaire de 0 à 1 est établie : si des contraintes sont présentes la notation est nulle et inversement.
3. L'occupation du terrain : ce critère rejoint celui du nombre de parcelle, si le site présente une occupation de bâti cela est peu avantageux au

développement d'un projet d'aménagement. Il s'agit d'un critère qualitatif à notation binaire : 0 pour l'absence de bâti et 1 pour la présence de bâti.

4. Etat foncier : l'état foncier du site correspond au caractère public ou privé du terrain. Pour ce critère qualitatif une notation binaire est mise en place : 0 pour un site public et 1 pour un site privé. La préférence ira vers un site public plutôt que privé.
5. L'altitude et la distance à la route : ces deux critères permettent de définir l'accessibilité du site. Une unité de traitement des déchets est une zone très fréquentée de ce fait elle nécessite d'être connectée au réseau routier et préférablement en basse altitude. Plus les valeurs de ces critères sont élevées moins elle sera favorable.
6. Proximité cours d'eau : lors de l'analyse cartographique une zone tampon de 35m autour des sites potentiels a déjà été appliquée. Ce critère est conservé car plus un site est proche d'un cours d'eau moins il sera préféré afin de prévenir la pollution des eaux.
7. Production de déchets : La production de déchets dans la zone du site est un facteur important qui traduit la viabilité économique de l'unité de traitement dans le temps. Plus la production est importante, plus le site est viable et plus il sera préféré.
8. Proximité des unités existantes : il est important pour un scénario de gestion d'être en connexion avec les unités de traitement complémentaires à l'activité toujours dans un esprit de viabilité économique. Plus la distance est courte, plus le site sera préféré. Etant donné le peu d'infrastructures existantes sur l'île, nous ne considérons pas dans ce critère le phénomène de compétitivité entre unités.
9. La pente : La pente des terrains est prise en compte puisqu'une construction de type unité de traitement ne peut se faire lorsque la pente excède 8%. Toutes les zones supérieures seront donc supprimées.

La Figure 116 synthétise ces critères par catégories comme suit :

- caractéristique du terrain : critères 1 et 2
- Occupation des sols : critères 3 et 4
- Accessibilité du terrain : critère 5 et 9
- Impacts environnementaux : critère 6
- Economie : critères 7 et 8

Seuls sont absents les critères sociaux délicats à mettre en œuvre pour un site donné. Toutefois, cette analyse serait à considérer dans les perspectives de l'étude. Ces critères pourraient être l'acceptabilité sociale et le nombre de population au chômage.

	Environnemental								Economique	
Critères	C1 Surface	C2 Frontière	C3 Occupation	C4 Etat foncier	C5 Altitude	C6 Distance de la	C7 Proximité de	C8 La pente	C9 Production de	C10 Proximité des
Site 1	Simulation MapInfo	Echelle binaire	Echelle binaire	Echelle binaire	Simulation MapInfo	Simulation MapInfo	Simulation MapInfo	Simulation MapInfo	Simulation MapInfo	Simulation MapInfo
Site 2										
Site 3										
Site 4										
Site 5										
Site 6										
...										
Site 129										
Site 130										
Site 131										
Site 132										
Site 133										

Figure 115 : Présentation de la construction du tableau de performance des sites

Ils peuvent également être classés par objectif d'aménagement selon les piliers du développement durable :

- Environnement : critères 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 et 8
- Economie : critères 9 et 10

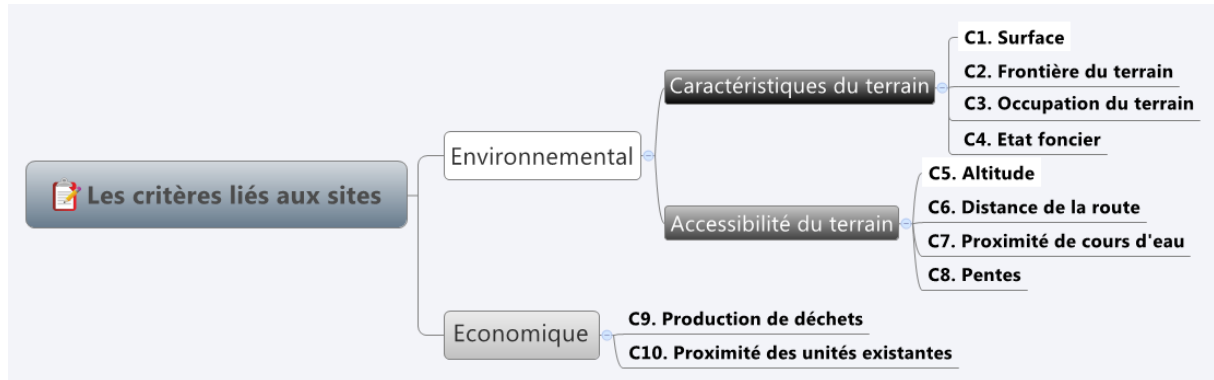


Figure 116 : Organisation des critères liés aux sites

Nous pouvons ainsi prendre en compte dans nos analyses des objectifs et des stratégies d'aménagement au-delà des critères exposés.

II.2.2 Présentation du tableau des performances

La majorité des évaluations de ces critères sont issues de simulations cartographiques réalisées à l'aide du logiciel MapInfo. Ces simulations ont été conduites pour les critères C1 à C9, autrement dit pour l'ensemble des critères environnementaux et économiques.

II.2.2.1 Les critères environnementaux

II.2.2.1.1 *Caractéristiques du terrain : C1 à C4*

1) C1 : La surface :

La surface est un calcul réalisé directement par logiciel pour tous les sites recensés.

2) C2 et C3 : La frontière du terrain et l'occupation du terrain :

Pour l'évaluation des frontières du terrain une échelle binaire de 0 à 1 a été considérée. Si les frontières du terrain sont complexes, nous avons noté 0 et au contraire si les frontières ne présentent pas de contraintes nous avons noté 1. Pour cela, nous avons utilisé Google Maps afin de superposer nos sites à une image satellite permettant l'observation du terrain dans un contexte réel.

La même méthode a été employée pour déterminer l'occupation des sites. S'il y avait présence d'un ou de plusieurs bâtiments, nous avons noté 1 et inversement lorsque le terrain était libre de toutes occupations.

3) C4 : L'état foncier :

L'état foncier du terrain, nous a été fourni par une cartographie de l'Etablissement Public Foncier (EPF) répertoriant les sites appartenant aux collectivités ainsi que leur attribution. Nous avons regroupé cette carte à notre carte de sites potentiels

afin de les combiner. Au final, nous obtenons une carte avec des terrains privés et publics potentiellement disponibles pour les activités visées. Afin de les identifier, nous avons noté 1 les sites privés et 0 les sites publics.

II.2.2.1.2 L'accessibilité du terrain : C5 à C8

1) C5 : L'altitude :

L'altitude a également été estimée à l'aide du logiciel de cartographie permettant la mesure des altitudes à 50m près. Dans notre cas, nous nous sommes arrêtés à identifier les altitudes à tous les 100 mètres. L'évaluation est évaluée selon le principe suivant : plus l'altitude est élevée plus le site est difficile d'accès et par conséquent non propice à l'implantation d'une unité de traitement.

2) C6 et C7: la distance à la route et la proximité au cours d'eau :

Ces trois critères ont été évalués comme la production de déchets. Pour l'estimation de la distance avec les routes, nous avons superposé la carte des sites respectivement à la cartographie routière. Puis grâce à l'outil de mesure des distances, nous avons pu obtenir les données recherchées.

3) C8 : La pente

La pente a été déterminée à l'aide des données de carroyage de l'INSEE. Comme pour les autres simulations, nous avons superposé notre carte des sites aux données de carroyage afin d'obtenir la pente pour chacun des sites retenus.

II.2.2.2 Les critères économiques : C9 et C10

1) C9 : Production de déchets :

Les quantités de déchets sont issues du chapitre 4. Afin de pouvoir considérer ces données dans un périmètre de 10 km² autour du site, nous avons utilisé l'outil de mesure des distances de MapInfo. Pour cela, nous disposons de notre carte des zones productrices en déchets à laquelle la carte des sites est superposée. Une fois ces deux cartes superposées, il est possible d'en déduire la production totale de déchets présente dans le périmètre d'étude du site. Ces données ont donc été obtenues par simulation sur le logiciel de cartographie.

2) C10 : Proximité des unités de traitement :

La carte des sites est superposée à une carte répertoriant toutes les infrastructures liées au traitement des déchets éditée par la Conseil Régional. Comme précédemment, l'outil de mesure permet de calculer la distance entre les unités considérées et les sites un à un.

II.2.3 **Pondération des critères pour l'évaluation des sites potentiels**

La pondération des critères est une étape délicate permettant d'introduire une importance relative à chaque critère car le classement final des sites peut être influencé par cette pondération. C'est pourquoi, en accord avec Alvarez et al ; 2009 et Coronado et al ; 2011, l'affectation des poids se fait selon 9 scénarios : un

scénario où les pondérations sont égales, deux scénarios extrêmes (0% et 100%), et plusieurs scénarios intermédiaires (Tableau 45). Ces scénarios permettent d'évaluer la sensibilité des rangs lorsque les pondérations varient. Ils sont par conséquent à différencier des scénarios de gestion des déchets. Les scénarios de pondération sont à visualiser comme une analyse de sensibilité.

Tableau 45 : Scénarios de pondération

Scénarios	Pondérations
Scénario 1	Tous les critères ont la même pondération
Scénario 2	100% Facteur limitant (FL)- 0% autres critères
Scénario 3	90% FL – 10% autres critères
Scénario 4	75% FL – 25% autres critères
Scénario 5	60% FL – 40% autres critères
Scénario 6	50% FL – 50% autres critères
Scénario 7	40% FL – 60% autres critères
Scénario 8	25% FL – 75% autres critères
Scénario 9	0% FL – 100% autres critères

II.3 Proposition de sites potentiels d'implantation

Lorsqu'une AMC est réalisée, il est suggéré d'utiliser différentes méthodes afin de s'assurer du degré d'incertitude lié aux modèles utilisés. Dans notre cas, nous nous basons sur une méthode et par conséquent sur un logiciel : PROMETHEE. L'idéal aurait été d'utiliser le packaging DEFINITE 3.0 qui combine quatre méthodes d'analyses multicritères permettant à la fois une analyse de sensibilité et d'incertitude des résultats. Une des raisons de ce choix autour de la méthode PROMETHEE est sa réputation et son taux d'utilisation de plus en plus élevé surtout autour des questions d'environnement. Nous utilisons donc ce logiciel pour l'évaluation des sites afin de proposer un classement du plus favorable au moins favorable, au travers des différents critères mis en place. Le paragraphe suivant s'attache à présenter les classements obtenus des sites potentiels.

Le tableau de performance est présenté dans la Figure 117. Ce tableau présente les valeurs utilisées pour la sélection des sites potentiels. Le nombre de sites potentiels et les communes associées sont synthétisés dans le Tableau 46.

Tableau 46 : Synthèse de la répartition des sites

Communes	Nombres de sites sur la commune
Le Tampon	14
Sainte-Suzanne	15
Saint-André	9
Saint-Paul	11
Saint-Leu	16
Sainte-Rose	13
Saint-Benoît	33
Saint-André	10
Salazie	6
La Possession	5

Les données, une fois rentrées dans PROMETHEE permettent d'obtenir un classement des sites du plus favorable au moins favorable selon les critères et les pondérations considérées. Au vu du nombre de sites, nous avons choisi de détailler les résultats obtenus pour une commune puis pour les trois premiers sites potentiels. Pour cela, nous commençons par présenter les classements pour la commune de la Possession.

Partie 2 – Chapitre 5 : Analyse des sites potentiels et proposition de scénarios de gestion des déchets

Scénario 1	Pente	Altitude	Distance rou...	Distance eau	Distance ISO	Densité	Occupation	Frontière	Quantité déc...	Distance Cdt	Etat foncier	Surface
Unit	unit	unit	unit	unit	unit	unit	unit	unit	unit	unit	unit	unit
Cluster/Group	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆
Preferences												
Min/Max	min	min	min	max	min	max	min	min	max	min	max	max
Weight	8,33	8,33	8,33	8,33	8,33	8,33	8,33	8,33	8,33	8,33	8,33	8,33
Preference Pn.	V-shape	Linear	V-shape	V-shape	V-shape	V-shape	Linear	Linear	Linear	V-shape	Linear	V-shape
Thresholds	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute
- Q: Indifference	n/a	1	n/a	n/a	n/a	n/a	1	1	1	n/a	1	n/a
- P: Preference	2	2	2,00	2,00	2,00	2	2	2	2	2,00	2	2,00000
- S: Gaussian	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Statistics												
Minimum	1	0	0,00	0,23	1054,51	0	0	0	1545	1252,08	0	0,00005
Maximum	52	1600	167,50	1392,40	39321,91	238	1	1	640294	40903,78	1	0,21694
Average	19	422	7,79	112,54	16917,99	13	0	0	171211	16323,26	0	0,01055
Standard Dev.	18	260	19,59	235,22	9073,77	30	0	0	123695	9437,36	0	0,02569
Evaluations												
action1	1	200	0,00	24,50	9262,38	5	0	0	114068	12749,83	0	0,00137
action2	3	0	0,00	3,19	10300,31	2	0	0	200723	15792,64	0	0,01381
action3	2	0	0,00	13,21	11798,25	0	0	0	193249	17541,58	0	0,00219
action4	1	0	0,00	13,27	10289,77	11	0	0	147622	10691,46	0	0,00143
action5	1	200	0,00	16,12	5310,88	0	0	0	206386	8657,57	0	0,00120
action6	2	200	0,00	134,38	6432,64	0	0	0	195356	9859,98	0	0,00120
action7	1	400	0,00	27,26	14645,72	8	0	0	489122	11841,24	0	0,00330
action8	1	400	10,00	39,39	17130,43	0	0	0	470689	14311,00	0	0,00101
action9	4	0	0,00	0,38	17795,72	0	0	0	464786	14700,43	0	0,00109
action10	1	0	0,00	278,84	26272,17	0	0	0	26820	4598,88	0	0,00144
action11	4	400	0,00	65,95	26077,66	0	0	0	26753	4534,45	0	0,00282
action12	2	400	0,00	34,86	27263,95	29	0	0	25363	3566,67	0	0,00133
action13	1	400	1,98	22,24	27649,73	0	0	0	29164	3088,03	0	0,00101
action14	2	400	10,00	329,55	25857,05	0	0	0	30475	5069,82	0	0,00226
action15	3	400	10,00	0,32	5969,49	0	0	0	203226	11456,19	0	0,01123
Scénario 1 / Scénario 2 / Scénario 3 / Scénario 4 / Scénario 5 / Scénario 6 / Scénario 7												
action76	49	200	10,00	34,38	7506,01	0	0	1	217364	9545,33	0	0,00111
action77	47	600	0,00	2,92	7470,10	4	0	1	209348	10267,53	0	0,00223
action78	48	600	0,00	0,53	7502,30	0	1	0	205232	10597,75	0	0,00207
action79	45	600	0,00	1,30	6579,92	7	0	1	209952	9468,60	0	0,00269
action80	34	600	0,00	1,17	6432,12	0	0	1	214042	8970,46	0	0,00518
action81	20	600	5,22	140,54	7507,80	0	0	1	204384	10668,89	0	0,00101
action82	9	600	0,00	95,37	6507,38	0	0	0	206562	9673,12	0	0,00382
action83	4	600	0,00	113,77	3994,09	4	1	0	208941	7325,70	0	0,00257
action84	2	600	0,00	10,16	4240,71	0	1	1	156917	5787,74	0	0,00463
action85	4	600	0,00	159,58	31621,26	3	1	0	35897	1997,19	0	0,00163
action86	3	200	0,00	0,60	28813,43	47	0	0	96870	6128,45	0	0,00109
action87	1	200	0,00	139,80	32666,19	15	1	0	105038	5670,63	0	0,00400
action88	4	200	0,00	1,51	31302,89	0	1	0	100892	5782,69	0	0,00195
action89	2	400	0,00	208,83	26932,47	0	1	1	109391	16160,73	0	0,00127
action90	1	600	0,15	86,76	10117,73	47	0	0	212156	8327,03	0	0,00435
action91	1	400	0,00	0,59	10681,26	0	0	0	200033	7894,34	0	0,00703
action92	7	600	0,00	103,60	10931,30	4	0	0	200019	8108,08	0	0,00306
action93	22	200	0,00	40,22	12530,11	9	1	0	193059	9747,82	0	0,00491
action94	36	600	10,00	0,94	12282,41	0	0	1	192745	9459,13	0	0,00275
action95	43	400	0,00	279,24	12505,91	42	1	0	189250	9508,25	0	0,00176
action96	46	400	0,00	68,78	15159,21	9	0	0	487254	12515,80	0	0,00151
action97	48	400	2,12	10,99	14310,81	27	1	0	489271	11588,08	0	0,00113
action98	49	400	0,00	3,83	13581,23	60	1	0	490880	11000,65	0	0,00124
action99	38	200	0,00	534,96	8744,58	0	0	0	212313	7929,13	0	0,00123
action100	30	0	10,00	108,01	8825,77	0	0	0	213352	7565,19	0	0,00101
action101	19	200	10,00	3,27	29321,91	0	0	0	9681	36606,03	0	0,00101
action102	17	400	10,00	0,80	32532,14	0	0	0	14136	29629,38	0	0,00162
action103	18	200	5,32	111,15	8443,76	19	0	0	52935	3887,05	0	0,00227
action104	17	400	0,00	1,09	8295,79	12	1	0	52687	4283,25	0	0,00852
action105	16	400	10,00	27,67	8647,49	0	0	0	91277	5926,52	0	0,00125
action106	19	400	0,00	100,79	27998,72	16	1	0	31167	33798,07	0	0,00215
action107	24	200	1,54	81,72	28050,15	15	0	0	31171	33793,17	0	0,00109
action108	30	800	0,00	1,79	29428,35	0	0	0	28723	35331,98	0	0,01364
action109	32	400	0,00	60,13	29719,00	1	0	0	28096	25736,37	0	0,01312
action110	37	400	0,00	1,36	32166,09	0	0	0	2851	38148,72	0	0,00348
action111	42	200	10,00	1,04	32579,41	0	0	0	2848	38605,14	0	0,00462
action112	52	1000	0,00	5,89	35023,04	12	0	0	1549	40983,78	0	0,01287
action113	51	400	0,00	1,08	2441,70	11	0	0	86618	4837,08	0	0,00293
action114	44	200	0,00	1,03	1526,93	19	0	0	82147	6571,25	0	0,00217
action115	32	800	0,00	28,90	4747,28	10	0	0	147334	7767,79	0	0,00292
action116	19	200	10,00	5,23	4400,93	28	0	0	149033	8923,14	0	0,00880
action117	11	400	10,00	3,21	4091,44	0	0	0	149025	8811,80	0	0,00210
action118	7	400	0,00	12,45	4151,65	0	0	0	146746	8252,67	0	0,00305
action119	6	600	10,00	1,82	3645,39	0	0	0	149060	8612,98	0	0,00262
action120	5	400	0,00	4,26	4245,10	0	0	0	149016	9158,57	0	0,00176
action121	3	600	10,00	10,66	4881,92	0	0	0	148937	8633,28	0	0,002570
action122	4	600	10,00	131,14	4618,04	0	0	0	146753	8343,36	0	0,00310
action123	3	600	3,67	60,48	3760,51	0	0	0	143031	10936,12	0	0,00118
action124	2	600	10,00	5,09	5343,75	0	0	0	141533	12234,62	0	0,00488
action125	1	80	1,62	23,65	4447,60	2	0	0	144426	10394,23	0	0,00266
action126	5	800	0,00	8,00	4551,13	0	0	0	148337	9765,24	0	0,00161
action127	16	400	10,00	17,30	5427,20	0	1	0	148971	9728,24	0	0,00206
action128	27	400	10,00	3,11	13807,43	0	0	1	286716	13263,71	0	0,01894
action129	37	1000	0,00	4,91	14865,04	15	0	0	282972	14527,45	0	0,00233
action130	45	1000	0,00	0,23	14696,52	12	0	0	282983	14531,55	0	0,00216
action131	48	1000	3,12	392,14	15372,45	4	0	0	173834	14782,98	0	0,00310
action132	47	600	10,00	333,61	15316,87	0	0	0	217672	14941,54	0	0,00104
action133	44	600	1,03	237,16	15261,62	4	0	0	217676	14819,00	0	0,00508
action134	32	200	0,05	150,28	11537,93	14	0	0	349138	10923,71	0	0,00655

Figure 117 : Tableau de performance des sites potentiels

La commune de la Possession :

Le graphique (Figure 118) présente les classements obtenus pour chacune des hypothèses de pondération.

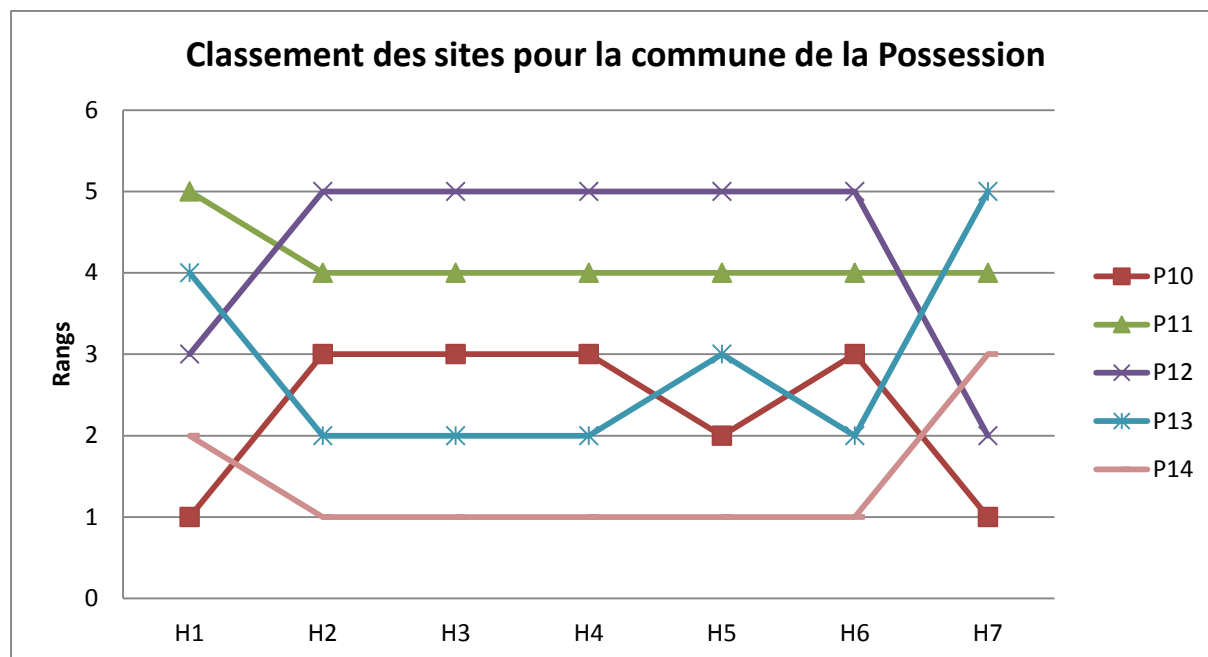


Figure 118 : Classement des sites potentiels sélectionnés pour la commune de la Possession

Pour l'Hypothèse 1 dans le cas où tous les critères sont pondérés de manière identique, le site P10 se classe en 1^{ère} position, puis P14, P12 en troisième position, P13 et en dernière position P11. Mais sur l'ensemble des Hypothèses mises en place, le site P10 par exemple est majoritairement classé en 3^{ème} position tandis que le site P14 est classé principalement en 1^{ère} position. Le site P11 est positionné en 4^{ème} rang quelles que soient les Hypothèses.

Si nous devons faire un classement final des sites en tenant compte de leur classement pour toutes les Hypothèses, on obtient le classement suivant :

- 1) P14
- 2) P13
- 3) P10
- 4) P11
- 5) P12

Sur les 5 sites potentiels présents sur la commune de la Possession, le site P14 serait le plus favorable à l'implantation d'une unité de traitement. Cette observation illustre bien l'importance de mettre en place plusieurs Hypothèses de pondération afin d'avoir un maximum d'éléments de comparaison.

Si l'on reprend les données chiffrées du tableau de performances (Tableau 47), nous nous apercevons que le classement s'effectue essentiellement en fonction du facteur

limitant à savoir la quantité de déchets présente dans un périmètre de 10km² autour du site. Le classement entre P14 et P13 montre également que les critères distance des cours d'eau et la surface du terrain ont plaidé en faveur de P14. Si nous effectuons cette analyse pour tous les classements, nous pouvons confirmer que tous nos critères d'évaluation ainsi que leurs paramètres de notations ont été pris en compte pour le classement.

Tableau 47 : Zoom sur le classement des sites de la Possession

	Pente	Altitude	Distance rou...	Distance eau	Distance ISD	Densité	Occupation	Frontière	Quantité déc...	Distance CdT	Etat foncier	Surface
action10	1	0	0,00	278,84	26272,17	0	0	0	26820	4598,88	0	0,00144
action11	4	400	0,00	65,95	26077,66	0	0	0	26753	4534,45	0	0,00282
action12	2	400	0,00	34,86	27263,95	39	0	0	25363	3566,67	0	0,00133
action13	1	400	1,98	22,24	27649,73	0	0	0	29164	3088,03	0	0,00301
action14	2	400	10,00	329,55	25857,05	0	0	0	30475	5069,82	0	0,00226

Les 3 premiers sites sélectionnés parmi les 133 sites sont :

- 1) SA16 : Site présent sur la commune de Saint-André,
- 2) T134 : Site présent sur la commune du Tampon,
- 3) SS125 : Site présent sur la commune de Sainte-Suzanne.

Le résumé des données pour ces 3 sites sont exposés dans le Tableau 48.

Tableau 48 : Zoom sur le classement des 3 sites potentiels pour l'implantation d'unités de traitement sur l'île

	Pente	Altitude	Distance rou...	Distance eau	Distance ISD	Densité	Occupation	Frontière	Quantité déc...	Distance CdT	Etat foncier	Surface
action16	3	400	0,00	353,98	6171,54	43	0	0	200615	12383,60	0	0,00120
action134	32	200	0,00	150,20	11537,93	14	0	0	349138	10923,71	0	0,00655
action125	1	80	1,62	23,65	4447,60	2	0	0	144426	10394,23	0	0,00266

Au regard des chiffres, nous pouvons conclure que les 3 sites potentiellement aptes à accueillir des unités de traitement sur l'île sont situé :

- entre des altitudes allant de 80 à 400m,
- entre 4 et 11 km de l'ISD le plus proche,
- entre 10 et 12 km des centres de tri,
- à moins 1km d'une route,
- ne sont pas occupés avec des frontières sans contraintes d'aménagement et il s'agit d'un terrain public pouvant être affilié à une activité de traitement,
- Et situé dans des zones très productrices de biodéchets avec des quantités allant de 144000 t/an à 349 000 t/an.

Néanmoins, nous pouvons observer que les sites 134 et 125 présentent des incohérences car respectivement pentus et proches de cours d'eau. Par ailleurs les densités d'habitants sont faibles respectant ainsi les contraintes liées aux habitations.

Nous proposons la même analyse pour les communes de Salazie, de Saint-Paul et du Tampon. Afin d’avoir des exemples sur différents types de communes.

La commune de Salazie :

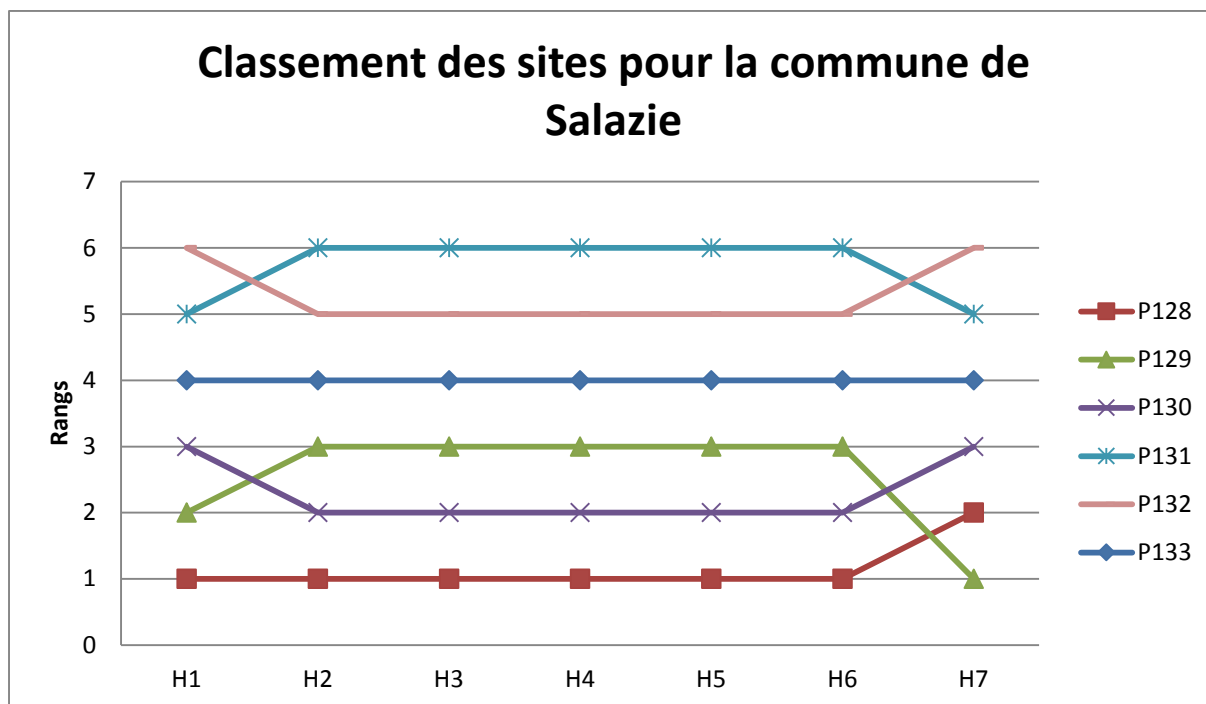


Figure 119 : Classement des sites potentiels sélectionnés pour la commune de Salazie

Pour le classement des sites potentiellement disponibles pour la commune de Salazie, les rangs en fonction des Hypothèses sont sensiblement les mêmes (Figure 113). Le choix des pondérations semble ne pas avoir d’effet sur le classement final si ce n’est pour H1 et H7. En effet, certaines inversions de rangs sont visibles pour l’ensemble des sites excepté P133.

De ce fait, nous pouvons en déduire un ordre final à savoir :

- 1) P128
- 2) P130
- 3) P129
- 4) P133
- 5) P132
- 6) P131

Au regard de ces observations, nous pouvons analyser les données chiffrées afin détailler le classement obtenu (Tableau 49).

Tableau 49 : Zoom sur les données chiffrées des sites potentiels de la commune de Salazie

Scénario 1	Pente	Altitude	Distance rou...	Distance eau	Distance ISD	Densité	Occupation	Frontière	Quantité déc...	Distance CdT	Etat foncier	Surface	
action128		27	400	10,00	3,11	13807,43	0	0	1	286716	13263,71	0	0,01854
action129		37	1000	0,00	4,91	14865,04	15	0	0	282972	14527,43	0	0,00233
action130		45	1000	0,00	0,23	14696,52	12	0	0	282983	14331,55	0	0,00216
action131		48	1000	3,12	392,14	15372,45	4	0	0	173834	14782,98	0	0,00310
action132		47	600	10,00	333,61	15316,87	0	0	0	217672	14941,54	0	0,00104
action133		44	600	1,03	237,16	15261,62	4	0	0	217676	14819,00	0	0,00508

Si nous prenons le site P128 en exemple afin d'interpréter ces résultats de classement, nous nous apercevons que pour la pente et l'altitude ce site présente les valeurs préférées. Ces valeurs sont une faible pente et une basse altitude. Par contre, pour la distance de la route, il s'en trouve éloigné de 10 mètres par rapport aux autres sites qui sont en bord de route. Mais au vu des valeurs, 10 mètres ne constituent pas une différence significative justifiant l'élimination du site P128. Pour les autres distances liées à la distance par rapport aux autres unités de traitement ce site présente les distances les plus courtes.

A ce stade, nous pouvons dire que le site P128 est proche d'un accès routier, se situe en basse altitude et est proche des unités de traitement permettant une gestion facilitée des extrants. De plus, il n'est pas occupé. Mais, il se compose de certains points négatifs comme des frontières difficiles liées à la topologie du terrain qui par ailleurs est un terrain privé.

Après ces observations un choix s'impose à savoir : le classement du logiciel me satisfait-il ou pas ? Dans ce cas, le site le plus approprié serait le site P133 car il rassemble le plus de valeurs préférées bien que situé à 600m d'altitude.

A cette altitude, il pourrait être envisagé de mettre en place une micro-station de méthanisation permettant de valoriser les déchets agricoles autour de zone dans un périmètre de 2km par exemple.

La commune de Saint-Paul :

La commune de Saint-Paul propose suite à la sélection de sites potentiels, 11 terrains (Figure 120). Comme précédemment, les classements sont plutôt homogènes excepté pour les Hypothèses H1 et H7. L'Hypothèse H1 soumet une pondération égale quelques soit les critères et H7 une préférence pour les autres critères face au critère limitant selon un rapport 0%/100%.

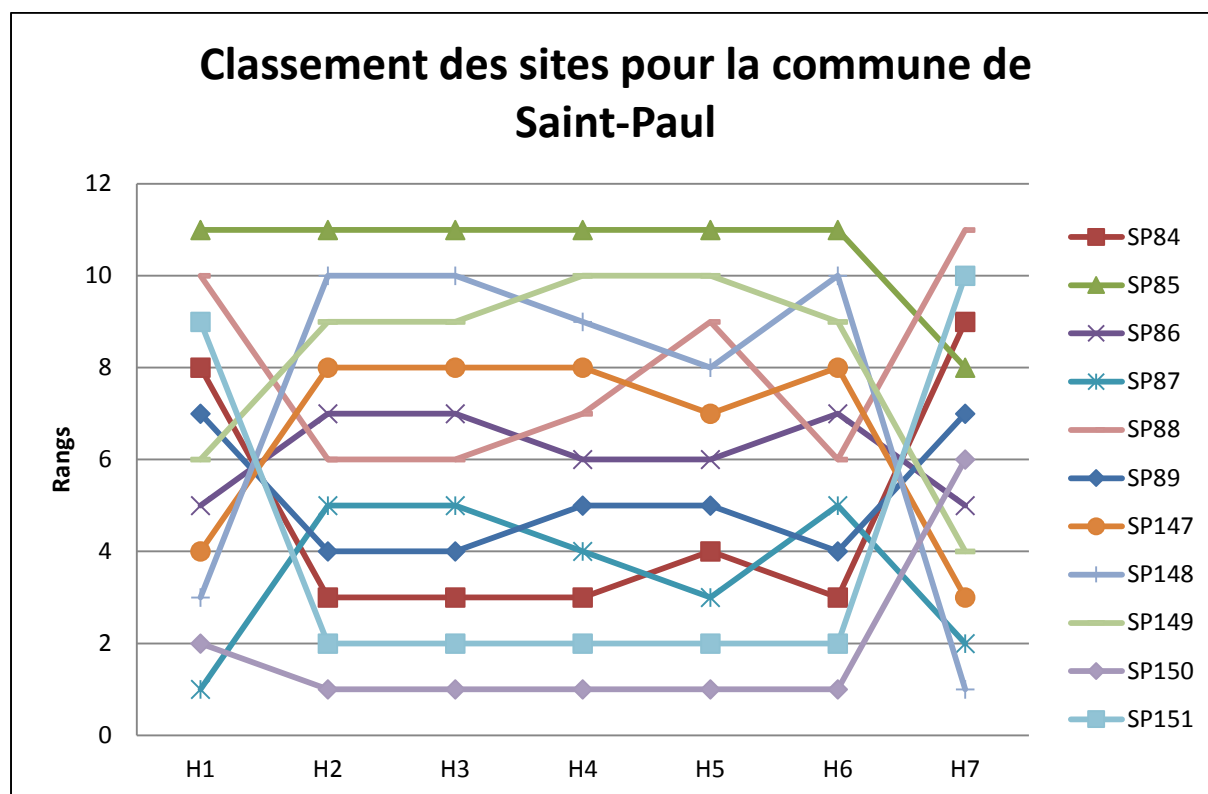


Figure 120 : Classement des sites potentiels sélectionnés pour la commune de Saint-Paul

Outre ces variations, le classement final est le suivant :

1) SP150	6) SP86
2) SP151	7) SP147
3) SP84	8) SP148
4) SP89	9) SP149
5) SP87	10) SP85

Au vu de la redondance de comportement, il semble intéressant d'identifier cette cause. Pour cela, et afin d'analyser ses différences de classement pour ces deux Hypothèses, nous nous attachons à observer les chiffres (Tableau 50). Il semble que ce sont les sites qui présentent des caractéristiques similaires qui varient lorsque les critères sont tous égaux (H1) et de même pour (H7). En effet, dès lors qu'ils ne sont plus soumis à un critère limitant, les rangs prennent des valeurs moyennes afin d'établir un classement.

Concernant le classement final, SP150 et SP151, les chiffres traduisent des majorités de valeurs de préférence, à savoir qu'il s'agit de terrains publics qui se situent dans des zones productrices en déchets et à basse altitude, le terrain est non occupé, à des distances comprises entre 10 et 30 km des unités de traitement existantes, proche des voies routières et de surfaces correctes. De ce cas, le classement des sites, nous semble tout à fait pertinent au regard des exigences de départ.

Classement des sites pour la commune du Tampon



La sélection des sites pour la commune du Tampon a recensé 14 sites potentiels pour l'implantation d'unités de traitement des déchets (Figure 121). A première vue, les classements semblent plus variables en fonction des Hypothèses que pour les exemples précédents. Cependant, nous pouvons visualiser que les évolutions générales des courbes sont identiques notamment pour H1 et H7, H2 et H6. Nous pouvons voir une certaines symétries dans la répartition de ces positions. Cette observation joint celle présentée pour la commune de Saint-Paul, à savoir que lorsque les Hypothèses de pondération favorisent d'autres critères que celui choisi comme étant limitant, les classements varient en faveur des valeurs prédominantes pour un site donné.

Nous pouvons également dire qu'établir un classement final n'est pas instinctif dans ce cas. En effet, les premiers semblent assez partagés entre plusieurs possibilités de sites. Avec une tendance plutôt stable à partir du rang 6. De ce fait, il est essentiel d'analyser les chiffres pour les 5 premiers sites (T134, T135, T136, T138, T141) afin de pouvoir proposer un ordre final des sites potentiels (Tableau 51).

Tableau 51 : Zoom sur les données chiffrées des sites potentiels de la commune du Tampon

Scénario 1	Pente	Altitude	Distance rou...	Distance eau	Distance ISD	Densité	Occupation	Frontière	Quantité déc...	Distance CdT	Etat foncier	Surface
action134	32	200	0,00	150,20	11537,93	14	0	0	349138	10923,71	0	0,00655
action135	20	400	10,00	219,34	11681,06	11	0	0	350580	10882,09	0	0,00738
action136	13	1000	0,00	72,63	11169,97	5	0	0	354314	10492,96	0	0,01227
action137	11	400	0,09	3,31	10977,18	22	0	0	209729	9009,71	0	0,01951
action138	10	1400	10,00	11,38	13656,99	0	0	0	642133	11586,87	0	0,00523
action139	11	200	3,29	15,71	11723,29	0	0	0	200787	9539,86	0	0,00774
action140	12	200	0,00	50,35	12346,26	0	1	0	197907	10228,61	0	0,00127
action141	14	1400	1,37	1,11	13133,26	0	1	0	648294	11600,01	0	0,04146
action170	4	600	20,94	36,05	15571,25	35	0	0	331253	14753,35	1	0,01902
action171	2	400	46,03	24,40	15590,84	35	0	0	331252	14779,34	1	0,00367
action172	1	400	0,00	2,56	15466,33	7	0	0	332105	14593,19	1	0,03727
action173	4	400	24,18	62,99	15689,44	96	0	0	329808	14884,86	1	0,00099
action174	14	400	0,00	1,24	17789,15	5	0	0	179282	17236,24	1	0,02650

Les chiffres montrent effectivement des similitudes entre les valeurs mais si nous nous basons sur les principales valeurs de préférences, à savoir, une faible altitude, une faible pente, des distances proches voir moyennes des routes et des installations de traitement et une quantité de déchets maximale. Nous pouvons, suite à ses préférences proposer le classement final suivant :

1) T135	8) T170
2) T136	9) T171
3) T137	10) T137
4) T138	11) T173
5) T141	12) T139
6) T172	13) T140
7) T169	14) T174

Cette analyse, nous a permis de constater que des sites répondant à la majorité des contraintes imposées pour l'aménagement d'unités de traitement des déchets sur l'île sont disponibles. De plus, ces sites sont présents en nombre non négligeable permettant un choix, en toute connaissance de cause, en comparaison des classements par Hypothèses.

III. Sélection et évaluation des scénarios retenus

A ce stade, nous rappelons nos objectifs basés sur la nécessité de proposer et d'établir un réseau d'unités de traitement sur l'île afin de répondre aux obligations de recyclage, de détournement des flux de l'enfouissement conformément à la directive européenne et de permettre la réduction des coûts de transport. Dans cette optique, nous découpons l'île en 5 cinq régions correspondant aux territoires des EPCI. Dans un idéal de gestion, nous préconisons que chacune de ces cinq régions deviennent autonomes dans leur mission de traitement des déchets. Le but d'appliquer la méthodologie d'AMC à ce cas d'étude est d'évaluer différents scénarios de gestion des déchets (différentes alternatives) afin d'en déterminer la solution la plus favorable. Dans un premier temps, nous présentons les scénarios élaborés et dans un deuxième temps, les critères sélectionnés selon la même approche que précédemment. L'étape finale consiste donc à remplir le tableau des performances afin d'appliquer l'AMC.

Afin d'effectuer un choix dans les scénarios à considérer, trois méthodes de sélection sont possibles :

- 1) Une étape de non sélection dite exhaustive, qui consiste à identifier et à définir tous les scénarios possibles,
- 2) Une étape de sélection dite essentielle, qui présente un panel de scénarios importants à considérer et à décliner selon plusieurs objectifs de traitement,
- 3) Une étape de sélection d'un échantillon représentatif du panel de scénarios dits scénarios retenus.

Parmi ces méthodes, nous nous sommes attachés à développer les méthodes 2 et 3. Pour cela, nous avons considéré un panel de scénarios nous paraissant les plus importants à développer, dans lequel nous avons choisi un échantillon de scénarios à analyser.

III.1 Sélection des scénarios de gestion des déchets

Pour cette étape, nous déterminons les alternatives de gestion des déchets en tenant compte des analyses développées précédemment (quantification, composition et typologie de commune) et en fonction des sites retenus par l'AMC. En plus de ces données, nous proposons une liste de scénarios possibles en fonction des différents modes de traitement et donc de filières possibles.

La construction des scénarios s'appuie sur les 5 phases de gestion de la collecte à l'élimination finale des déchets. Dans notre étude, nous nous intéressons au traitement des biodéchets avec pour objectifs principaux :

- 1) de les détourner au maximum de l'enfouissement. Objectifs « zéro déchet » en enfouissement,
- 2) minimiser les émissions de gaz à effet de serre ?
- 3) optimiser la production d'énergie
- 4) minimiser les coûts en énergie,
- 5) minimiser les nuisances,
- 6) optimiser les incidences économiques et sociales.

L'enfouissement étant le principal mode de « traitement » des déchets à la Réunion, de plus, avec des centres arrivant à saturation, il semble nécessaire de proposer des scénarios afin de remédier à cette situation. Faisant ainsi défaut sur le territoire, il nous semble opportun de mettre en place des scénarii évitant la mise en ISDND des déchets et refus de traitement. Le « Zéro déchet » en enfouissement constitue donc le premier objectif de construction des scénarii, le second est la maximisation de la production d'énergie à partir des déchets via des modes de traitement adaptés dans le but de contribuer à atteindre l'autonomie énergétique de l'île d'ici 2020.

La mise en place des scénarii se base donc sur les différentes phases de gestion. Pour chacune d'elles des hypothèses ont dû être émises afin d'élaborer les scénarios.

Concernant la phase de collecte, nous considérons deux modes :

- 1) Le mode multi-matériaux en mélange soit une collecte à deux voies,
- 2) Le mode multi-matériaux en mélange à trois voies avec une voie spécifique à la collecte des biodéchets.

Concernant la phase de prétraitement et de tri, nous considérons à la fois les procédés de tri mécanique et de prétraitement biologique pour la collecte à 2 voies. Pour la collecte à 3 voies, seul le tri mécanique est considéré.

Pour la phase de traitement, nous avons choisi d'effectuer des regroupements de procédés afin d'optimiser les résultats et ainsi de répondre aux objectifs visés (méthanisation, compostage, TMB, gazéification, traitement physico-chimique...). Les technologies utilisées ont pour but essentiel de gérer une quantité donnée de déchets organiques et de déchets associés.

Toutefois, ces technologies permettent également la production de produits induits et donc valorisables tels que le composte ou le biogaz. Ces produits valorisables ajoute des « secondes fonctions » comme produire de l'énergie et/ou produire un fertilisant organique. Ces secondes fonctions permettent d'orienter les scénarii vers une valorisation adaptée aux besoins. Nous rappelons que nous définissons les besoins selon trois groupes :

- 1) Les besoins énergétiques (électricité, chaleur, froid),
- 2) Les besoins organiques (amendement et engrais),
- 3) Les autres besoins (biocarburant, matériaux de construction).

Les scénarii seront donc présentés selon les différents modes de collectes envisagés, et selon les modes de traitement. Mais ils seront également présentés selon différentes modalités d'élimination, le tout reposant sur des hypothèses de base. Chaque scénario s'attèlera à traiter les déchets organiques et les déchets ultimes liés au processus de gestion.

Les hypothèses de base sont présentées pour chacun des flux de biodéchets afin de cerner au mieux les enjeux et adapter les scénarios en fonction des flux.

Cette partie consiste à exposer dans un premier temps les hypothèses émises sur chaque flux constituant le gisement de biodéchets identifiés dans le chapitre 4. Dans un deuxième temps, nous présenterons les options retenues pour proposer un panel de scénarios appliqués à l'étude de cas. Et dans un troisième temps, l'analyse multicritères et les résultats obtenus.

III.1.1 **Les hypothèses de base**

III.1.1.1 La FFOM

La collecte en porte à porte de la FFOM en mélange avec les OM et la collecte en porte à porte de la FFOM triée à la source sont considérées pour la construction des scénarii. La commune de Sainte-Rose a expérimenté en 2004 la collecte à la source de la FFOM en vain. Mais malgré ce constat, il semble important de revoir cette possibilité avec les nouvelles technologies existantes.

Ces biodéchets sont, soit collectés en mélange avec les OM et enfouis en ISDND, soit détournés via le compostage individuel. La FFOM constitue un gisement de près de 20 170 t_{MO}/an. Ces déchets peuvent être traités soit par méthanisation, soit par gazéification afin de valoriser leur fraction énergétique.

Les produits induits matière engendrés par l'installation de traitement peuvent être valorisés organiquement sous forme d'amendement ou sous forme de matériaux de construction. Et les produits induits énergie peuvent être valorisés soit sous forme d'électricité ou sous forme de biocarburant.

III.1.1.2 Les déchets verts

La collecte des déchets verts s'effectue en porte à porte ou par BAV aux déchetteries. Les déchets verts sont broyés et compostés. Le compost produit est utilisé par les communes pour l'entretien de leurs espaces verts et vendu aux particuliers. Cette commercialisation est possible grâce à une dérogation fournie par le Préfet, car le compost de déchets verts à la Réunion n'est pas conforme à la norme NFU 44-051. En effet, la caractérisation du compost montre une quantité élevée de nickel et de chrome. Une étude menée par la mission de valorisation agricole des déchets (MVAD) en 2007 a permis de mettre en évidence des hypothèses concernant l'origine des éléments traces métalliques (ETM) composant

le compost. Ces ETM sont, selon cette étude, naturellement présents dans les sols réunionnais. De ce fait, la terre qui compose le compost serait chargée en ETM et participerait à hauteur de 80% du phénomène tandis que les 20% restant seraient dû à l'existence de végétaux bio-accumulateurs.

Les communes tendent à homologuer le compost de déchets verts afin de pouvoir l'utiliser comme amendement organique sur les cultures.

Au vu de ces difficultés de normalisation, il serait préférable d'envisager d'autres solutions comme la méthanisation des tontes et la gazéification des parties ligneuses. Mais cette approche, nécessite une caractérisation plus fine des déchets verts à savoir connaître la part de chacune des fractions et leur composition pour pouvoir les traiter séparément. Ici, des études montrent l'effet de la méthanisation sur la concentration des ETM (Barret, 2000).

III.1.1.3 Les boues de STEP

Les boues de STEP sont principalement traitées par voie biologique. Ces boues sont séchées puis enfouies. L'épandage des boues n'était pas possible du fait de la présence d'ETM au même titre que le compost de déchet vert, la composition n'étant pas conforme à la norme NFU 44-095.

Certains départements de Métropole connaissent le même problème, c'est pourquoi l'APCA et l'ADEME ont mis en place une démarche afin de réaliser une demande de dérogation pour l'épandage des boues grâce à l'édition d'un guide. Suite à ce guide, la DAF et l'OLE de la Réunion ont mené une étude afin de confirmer une telle démarche sur l'île. Depuis 2008, les boues de STEP peuvent être épandues par demande auprès du Préfet pour l'obtention d'une dérogation au décret, sur la base de ce rapport. Cette demande devra être accompagnée d'un plan d'épandage précisant les quantités et les parcelles concernées.

Il serait également intéressant de traiter les boues de STEP par méthanisation afin de diminuer la charge organique, de les désodoriser et de les hygiéniser avant épandage. Les boues pourraient être également traitées par gazéification après séchage. Par contre, la valorisation des boues par co-compostage avec les déchets verts est écartée par la difficulté d'épandage existante et à la présence d'ETM.

III.1.1.4 Les effluents agricoles

Les effluents agricoles sont gérés séparément des autres gisements. Ils sont généralement épandus sur les cultures voisines par arrangement entre agriculteurs et via un plan d'épandage. Il n'est plus à prouver qu'il est préférable de méthaniser ces effluents avant épandage afin d'éliminer les éventuels agents pathogènes présents mais surtout pour réduire les odeurs émises par la matière fraîche. De plus, la valorisation par méthanisation des effluents permet non seulement la production d'un amendement et d'un fertilisant minéral de qualité mais aussi la production d'énergie. Comme pour les boues, les digestats peuvent être soit épandus, soit gazéifiés pour avoir un apport énergétique supplémentaire et des résidus réduits au maximum en volume.

III.1.1.5 Les biodéchets d'IAA

Les biodéchets des IAA sont collectés avec les OM et sont éliminés en ISDND. Dans ce cas, la gestion la mieux appropriée serait la gestion interne de ces déchets par la création de petites unités de méthanisation ou de gazéification calibrées aux besoins de l'industrie. Ces petites installations rendraient autonomes les industries en chaleur voir même en électricité. Ce type de gestion étant coûteux, il n'est pas évident pour les PME de financer de tels projets.

C'est pourquoi, une gestion collective de ces biodéchets est à envisager soit entre IAA d'une même zone, soit avec les OM de manière raisonnée.

III.1.1.6 Les biodéchets organiques des GMS et des commerces alimentaires

Ces gisements sont collectés comme les biodéchets des IAA avec les OM puis enfouis. Ils pourraient faire l'objet d'un traitement commun avec les déchets des IAA ou avec les OM via méthanisation ou gazéification.

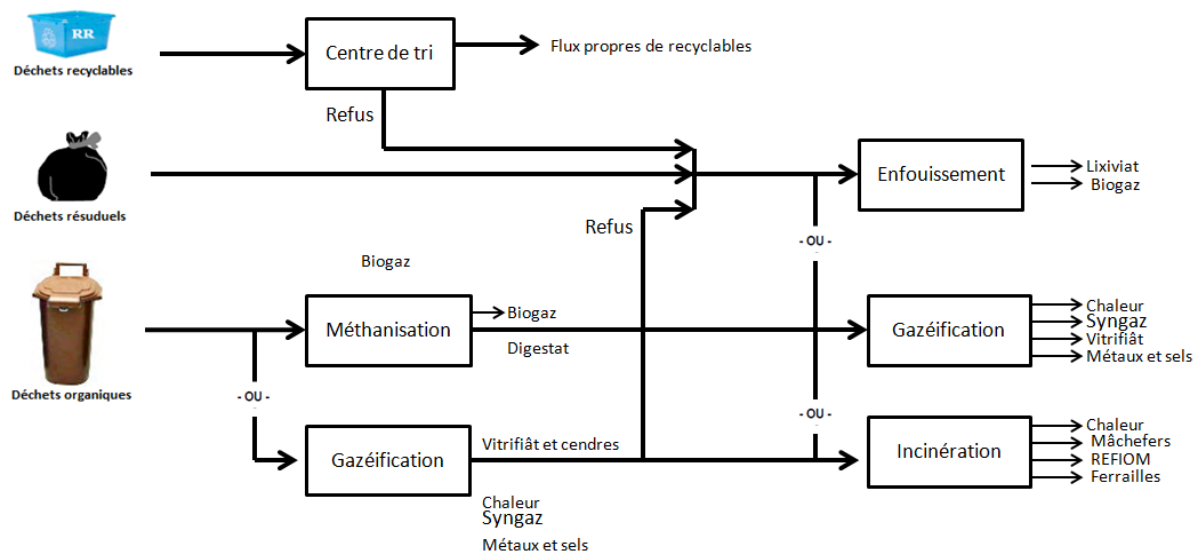
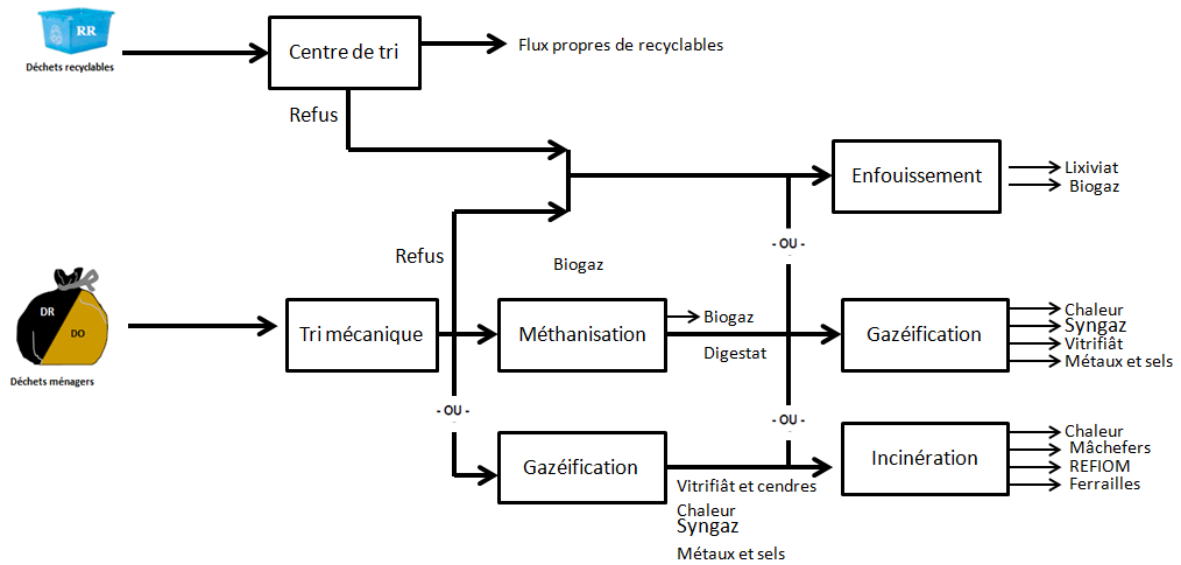
III.1.1.7 Les biodéchets de la restauration collective et des marchés forains

Ce gisement comme précédemment est collecté avec les OM puis enfoui. Ces déchets seraient à traiter comme la FFOM.

III.1.1.8 Projection autour des hypothèses de base

Au vu des difficultés actuelles à homologuer le compost issu des déchets verts, il semble que le même problème serait observé pour les digestats issus de la méthanisation. En effet, les biodéchets pouvant contenir des ETM, ce phénomène de concentration des polluants pourrait se répéter. De ce fait, nous avons décidé de nous orienter principalement sur leur valorisation énergétique par gazéification ou sur leur transformation en granulés. Les granulés fabriqués pourraient servir par exemple, de combustibles dans les centrales thermiques et ainsi réduire la part d'énergies fossiles. De plus, les faibles surfaces disponibles pour l'épandage de digestats ou autres amendements ne permettraient pas d'utiliser la totalité du produit composté. Le fait d'associer une unité de méthanisation à une unité de gazéification permet de contrôler les quantités à épandre en fonction des besoins, le reste serait valorisé énergétiquement. Cela éviterait la surproduction de compost et donc une perte inévitable à enfouir et ce quel que soit le flux de biodéchets considéré.

En outre, les digestats issus du traitement des boues de STEP sont soumis à une réglementation spéciale qui rend leur valorisation organique plus contraignante. De ce fait pour la construction des scénarii, leur traitement est à considérer séparément des autres gisements. Maintenant que les hypothèses émises pour chaque flux sont posées, nous nous attachons à présenter les scénarios retenus.



III.1.2 **Construction des scénarios**

Les scénarios sont construits autour de 5 phases de gestion : la collecte, le prétraitement, le traitement des déchets primaires, le traitement des produits induits et leur gestion finale. Nous avons exposé qu'un scénario de gestion et de traitement des déchets commence par le choix des flux de déchets à traiter ainsi que le choix du mode de traitement. Afin d'illustrer nos scénarios, nous avons souhaité développer la rédaction autour des déchets ménagers et assimilés (DMA) afin de poursuivre dans la continuité du chapitre 3.

Le choix des DMA est stratégique. En effet, il nous permet de présenter un ensemble des scénarios pouvant s'adapter à d'autre flux de biodéchets. Le but dans la gestion des DMA est principalement celui d'extraire la FFOM afin de la valoriser mais également de considérer les flux associés (refus, déchets encore valorisables). Et ainsi de proposer une gestion la plus complète et raisonnée possible en maximisant la production d'énergie et le « zéro déchets » en enfouissement.

Une fois, le déchet à traiter choisi, il est essentiel de considérer le mode de traitement. Nous avons présenté lors du chapitre 3, 6 modes de traitement possibles pour les DMA, à savoir :

- Le compostage,
- La méthanisation,
- L'incinération,
- La gazéification,
- L'ISD,
- Le traitement enzymatique.

A ce stade, une infinité de scénarios est possible. En effet, une combinaison exhaustive des scénarios de gestion et de traitement serait impossible. Nous pourrions estimer cette diversité de combinaison selon un ordre de grandeur à la puissance 6 (100 000). De ce fait, notre but n'est pas d'être exhaustif mais de proposer une déclinaison de scénarios adaptés aux besoins du moment dans un contexte économique prédéfini.

Nous procédons donc en deux étapes : la première présente les modes et procédés retenus pour chacune des 5 phases de gestion pour ensuite présenter globalement les scénarios de gestion dans une deuxième étape.

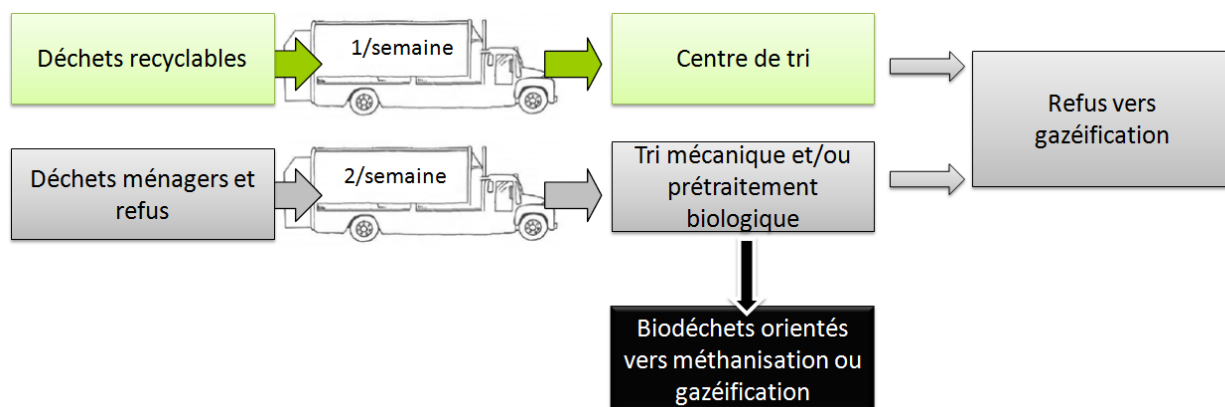


Figure 124 : Les prétraitements et traitements envisagés dans une collecte à deux voies

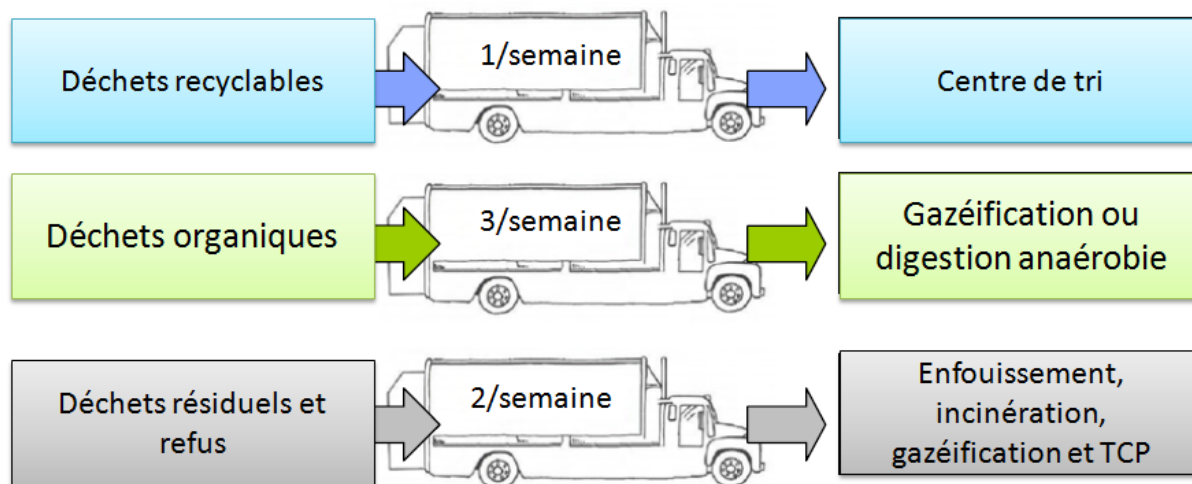


Figure 125 : Les prétraitements et traitements envisagés dans une collecte à trois voies

III.1.2.1 Les options de collecte

Une des phases de gestion la plus importante est la collecte. Si, nous considérons les **biodéchets ménagers**, deux modes de collecte sont à prendre en compte, soit une collecte à trois voies, soit une collecte à deux voies. Cette collecte s'effectue selon un mode de ramassage en porte à porte. C'est le mode de collecte qui détermine la nécessité ou pas de moyens de prétraitement. Si les biodéchets sont collectés en mélange avec les ordures ménagères (2 voies), il y a besoin de récupérer la part fermentescible présente. Dans le cas où les biodéchets sont collectés à la source (3 voies), il n'y aura pas besoin de prétraitement, ils pourront être acheminés directement à l'unité de traitement.

Nous avons identifié précédemment deux modes de collecte en porte à porte :

- La collecte à deux voies où les biodéchets sont collectés en mélange avec les OM et la collecte des recyclables. Il s'agit du schéma actuel de collecte à la Réunion (Figure 124),
- La collecte à trois voies où les biodéchets sont collectés séparément des OM. Il y a donc une collecte des biodéchets, une collecte des OM et une collecte des recyclables (Figure 125).

III.1.2.2 Les options de prétraitement et de tri

La phase de prétraitement est nécessaire dans le cas d'une collecte à 2 voies et optionnelle dans le cas d'une collecte à 3 voies. De même que pour la phase de collecte, nous allons avoir deux choix possibles :

- Le tri mécanique pour isoler les déchets indésirables des biodéchets comme les plastiques, métaux, verres...
- Le prétraitement biologique pour hygiéniser les biodéchets avant traitement.

Ces deux procédés sont à associer pour les prétraitements des biodéchets en mélange (2 voies). En effet, les biodéchets doivent dans un premier temps être séparés des autres flux de déchets pour ensuite être hygiénisés avant l'étape de traitement.

Les déchets organiques sont dans ce cas triés mécaniquement à l'image du prétraitement de la ville de Malmö en Suède (annexe 3). Les déchets sont pressés, broyés... mais ne subissent pas à ce stade de dégradations biologiques. A la suite de ce prétraitement, les biodéchets sont transportés vers les unités de traitement adaptées. Le but ici est juste d'extraire les biodéchets des OM. Une fois, séparés des autres déchets, les biodéchets peuvent être hygiénisés par traitement biologique.

Lorsque les biodéchets sont collectés à la source (3 voies), seul le prétraitement biologique peut être considéré. Parallèlement les biodéchets collectés selon une collecte à trois voies peuvent aller directement en traitement par un procédé de traitement enzymatique avant de rejoindre les procédés de traitement des déchets primaires.

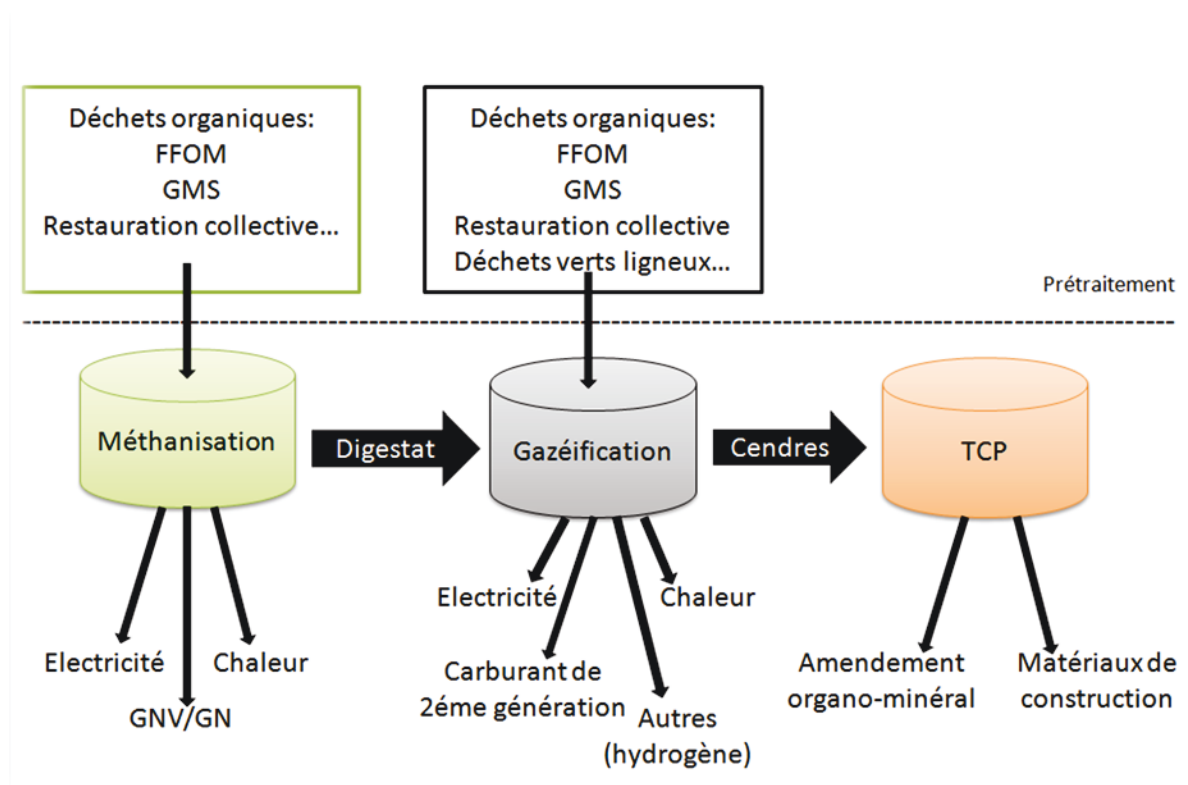


Figure 126 : Schéma synthétique des scénarii possibles avec un prétraitement

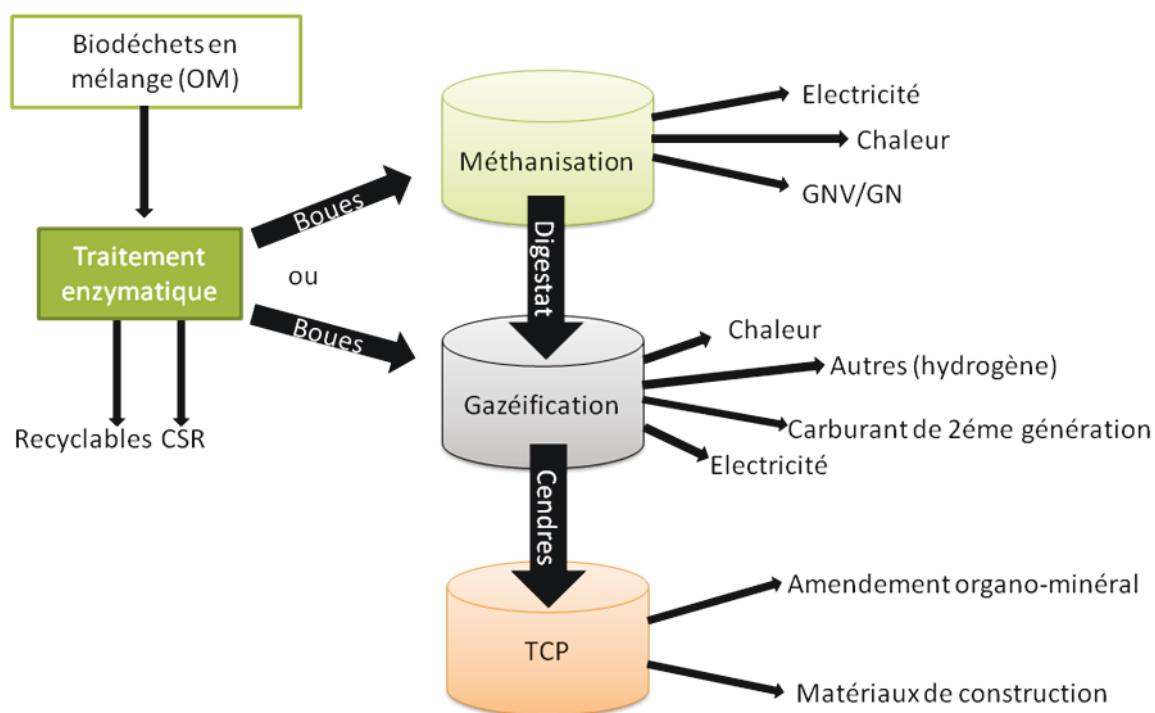


Figure 127 : Schéma synthétique des scénarii possibles avec Traitement enzymatique

Dans ce cas, les biodéchets collectés en mélange entrent dans le procédé de traitement enzymatique où la matière organique est hydrolysée afin d'être séparée des matières solides. Les boues obtenues seront transportées vers un procédé de traitement choisi. Les Figure 124 et Figure 125 présentent les différentes possibilités considérées pour les collectes à deux et trois voies.

III.1.2.3 Les options de traitement des déchets primaires et des produits induits

Les options possibles dans la phase de traitement sont présentées ainsi que les exutoires considérés pour les résidus. Il est important de rappeler que les scénarii construits sont basés sur deux principaux objectifs :

- Produire un maximum d'énergie afin de contribuer à atteindre l'autonomie énergétique de la Réunion d'ici 2020,
- Et « zéro déchets » en enfouissement afin de répondre à la problématique de saturation des ISDND.

Afin de répondre à ces principaux objectifs, parmi les procédés de traitement nous réduirons au possible l'intervention des installations de stockage. Toutefois, l'ISD sera considéré à titre de scénario de référence et en dernier recours pour la gestion des déchets ultimes. En parallèle, nous proposons un scénario de gestion basé sur l'incinérateur afin d'étudier cette possibilité sur l'île. Ce sujet faisant actuellement l'objet de nombreuses polémiques, il semble intéressant de le mettre en comparaison avec d'autres scénarios de gestion. Notre but est de voir si l'implantation d'incinérateur à la Réunion pour le traitement des ordures ménagères est nécessaire ou pas, et si l'utilisation des ISD peut être réduite au maximum.

Par ailleurs, comme nous l'avons vu dans le chapitre introductif, les principaux besoins énergétiques à la Réunion sont les besoins en électricité et les besoins en carburant. C'est pourquoi, nous avons choisi de proposer plusieurs alternatives possibles au sein des scénarii de traitement afin de répondre à ces différents besoins de valorisation.

Comme précisé plus haut, notre but n'est pas de proposer une liste exhaustive de scénarios mais de montrer un aperçu de l'éventail des possibilités. Pour cela, nous avons choisi de considérer deux modes de traitement des déchets primaires à savoir la méthanisation et la gazéification et deux modes de traitement des produits induits : le traitement physico-chimique (TPC) et la centrale thermique (CT).

Nous avons délibérément choisi d'écarter le compostage des procédés de traitement sachant qu'il serait difficile de l'homologuer et d'écouler les stocks produits. Néanmoins, le surplus de compost produits pourraient être transformé en granulé afin d'être valorisé énergétiquement par gazéification ou dans les fours des centrales thermiques. Localement des études de faisabilité sont en cours afin de vérifier la possibilité d'une co-incinération de la bagasse et des déchets en centrale thermique.

La Figure 126 et la Figure 127 synthétisent les scénarii considérés et décrits dans les paragraphes suivants ainsi que le Tableau 52. La Figure 128 résume les options possibles de scénarios.

Tableau 52 : Synthèse de l'organisation des scénarios

Type de collecte	2 voies		3 voies
Pré-tri et Prétraitement	1) Tri mécanique et Prétraitement biologique	2) Traitement enzymatique et Tri mécanique	Prétraitement biologique (optionnel)
Traitement des déchets primaires	Méthanisation et gazéification		
Traitement des produits induits	Centrale thermique et Traitement physico-chimique		
Gestion des déchets ultimes	Incinération et ISD		

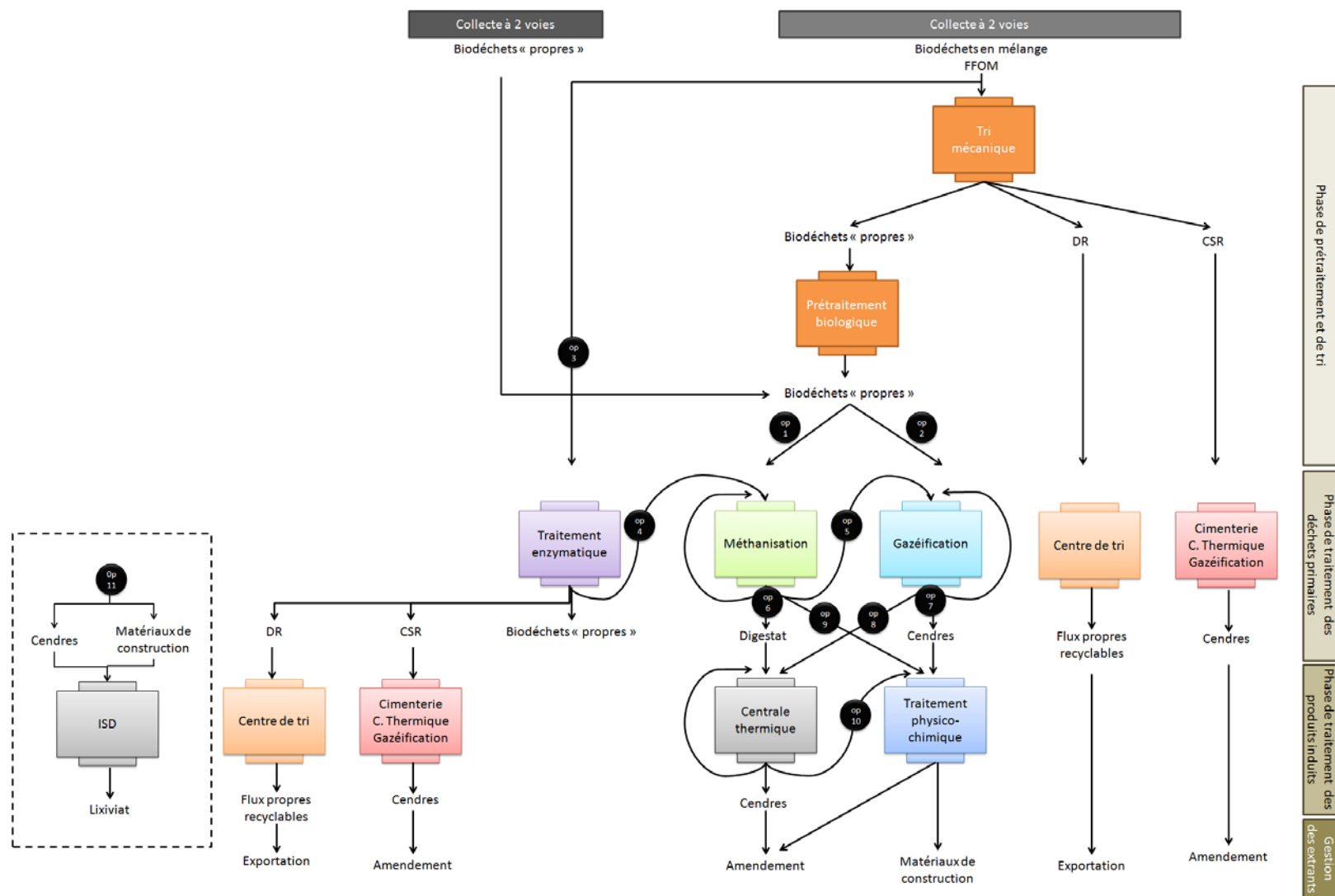


Figure 128 : Synopsis des différentes options de scénarios possibles

Tableau 53 : Synthèse des scenarii envisageables

	Scénarios	Pré-tri et prétraitement	Traitement des déchets primaires	Traitement des produits induits
			Collecte à 2 voies	
Valorisation électrique	sc1		Incinération	Centrale thermique/ISD
	sc2		ISD	Centrale thermique/ISD
	sc3		Incinération/ISD	Centrale thermique/ISD
	sc4	TM/PTB ou TE	Méthanisation	Gazéification/Centrale thermique/ISD
	sc5	TM/PTB ou TE	Méthanisation	Centrale thermique/ISD
	sc6	TM/PTB ou TE	Gazéification	Centrale thermique/ISD
	sc7	TM/PTB ou TE	Méthanisation	Gazéification/Centrale thermique/ Incinération
	sc8	TM/PTB ou TE	Méthanisation	Centrale thermique/ Incinération
	sc9	TM/PTB ou TE	Gazéification	Centrale thermique/ Incinération
	sc10	TM/PTB ou TE	Méthanisation	Gazéification/Upgrading/ISD
	sc11	TM/PTB ou TE	Méthanisation	Upgrading/ISD
	sc12	TM/PTB ou TE	Gazéification	Upgrading/ISD
	sc13	TM/PTB ou TE	Méthanisation	Gazéification/TPC
	sc14	TM/PTB ou TE	Méthanisation	TPC
	sc15	TM/PTB ou TE	Gazéification	TPC
	sc16	TM/PTB ou TE	Méthanisation	Gazéification/ Centrale thermique/TPC
	sc17	TM/PTB ou TE	Méthanisation	Centrale thermique/TPC
	sc18	TM/PTB ou TE	Gazéification	Centrale thermique/TPC
	sc19	TM/PTB ou TE	Méthanisation	Gazéification/Upgrading/ TPC
	sc20	TM/PTB ou TE	Méthanisation	Upgrading/TPC
	sc21	TM/PTB ou TE	Gazéification	Upgrading/TPC

III.1.3 **Présentation des scénarios**

Ce qui est essentiel dans la construction de scénario est la considération des produits induits afin de permettre leur gestion raisonnée. En effet, ces produits induits arrivant à différents niveaux de la chaîne de gestion des déchets, il est important d'anticiper leur production pour les valoriser et ainsi éviter leur mise en enfouissement ou en incinération. Le Tableau 53 présente un panel des scénarios potentiels en fonction des besoins de valorisations. Ces valorisations sont les suivantes :

- Valorisation électrique,
- Valorisation en biocarburant,
- Valorisation en amendement organique ou en matériaux de construction.

De ce fait, une déclinaison de 21 x 2 scénarios est envisageable pour une collecte à deux voies auxquelles, il est possible d'ajouter 21 autres possibilités pour la collecte à trois voies au vu des hypothèses choisies dans le paragraphe précédent. Un panel de 53 scénarios est donc concevable (Tableau 53).

Nous avons donc dans cette première étape, identifié un certain nombre de scénarios en fonction des différentes options de prétraitement, de traitement des déchets primaires et des traitements des produits induits.

Au vu de la diversité de scénarios exposés, nous avons pris le parti d'en sélectionner 13 que nous nommerons **Sc**. Ce choix s'est basé sur la nécessité d'évaluer chacune des valorisations considérées. Les paragraphes suivants s'attachent à présenter chacun des 13 scénarios retenus pour la suite de l'analyse.

Tableau 54: Synthèse des scénarios retenus

Scénarios		Essentiel: sc	sc1	sc2	sc3	sc4	sc7	sc10	sc13	sc16	sc19	sc22	sc25	sc25	sc28
		Retenus: Sc	Sc1	Sc2	Sc3	Sc4	Sc5	Sc6	Sc7	Sc8	Sc9	Sc10	Sc11	Sc12	Sc13
TDP		Méthanisation				X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
		Gazéification				X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
		Incinération	X		X										
		ISD		X	X										
TPI	Flux Energie	Centrale thermique	X	X	X	X	X				X		X	X	X
		Upgrading						X	X			X	X	X	X
	Flux matière	TPC								X	X	X	X		
		Incinération ISD	X		X	X	X	X	X					X	X

III.1.4 Les scénarios retenus pour l'AMC

Les 13 scénarios retenus sont articulés autour des différentes valorisations identifiées. Pour cela, nous avons choisi de les classer en 3 paragraphes correspondant aux valorisations. Le Tableau 54 synthétise les scénarios retenus et rappelle leur références « sc » afin de repérer leur correspondance Sc. Notre choix s'est porté sur 3 scénarios considérés comme scénarios de référence et tous les scénarios combinant à la fois les procédés de méthanisation et gazéification. Ces choix sont conditionnés selon les objectifs visés à savoir la maximisation de la production d'énergie. Du fait, de l'association de deux procédés permettant cette valorisation, nous nous intégrons pleinement dans cet objectif ainsi que dans l'objectif « zéro déchets » en enfouissement par la réduction maximale des volumes des produits induits par la succession de traitement.

III.1.4.1 Les scénarii de valorisation en électricité

Les scénarii permettant la valorisation des déchets en électricité sont au nombre de 5. Parmi ces 5 scénarios, nous avons identifié les 3 scénarios de référence à savoir le tout à l'incinération avec revalorisation énergétique, le tout à l'enfouissement avec revalorisation énergétique et un scénario combinant les deux modes de traitement respectivement Sc1, Sc2 et Sc3. Les scénarios Sc4 et Sc5 permettent la valorisation énergétique grâce à l'association des procédés de méthanisation et de gazéification (Figure 129).

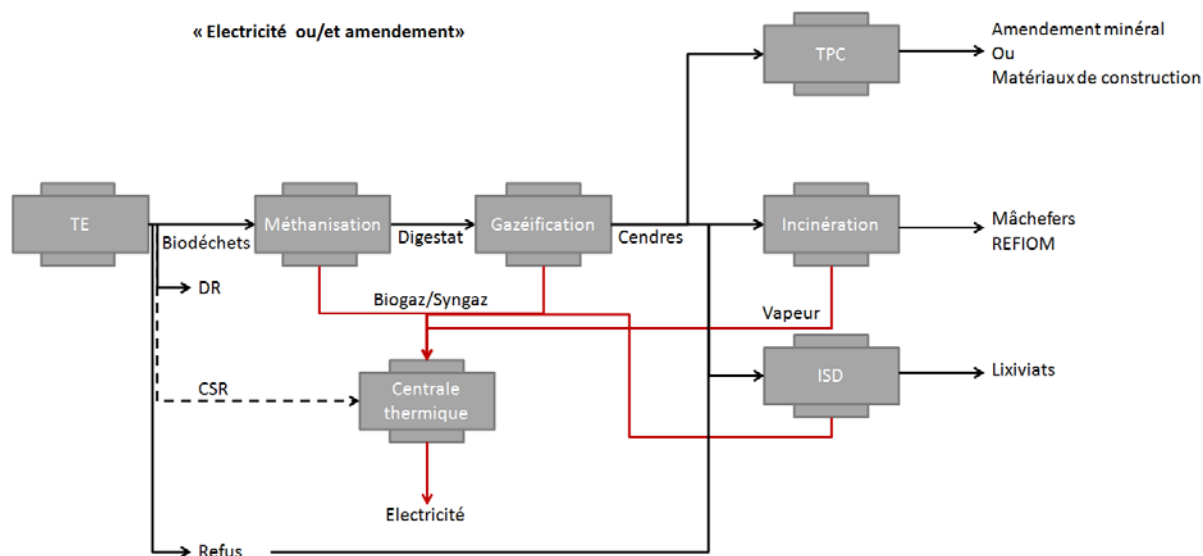


Figure 129 : Présentation systémique des scénarios permettant la production d'électricité

Sc1 : Scénario Incinération/centrale thermique/ISD :

Les déchets ménagers en mélange sont acheminés à l'incinérateur pour y être traités. La chaleur produite lors de combustion des déchets est récupérée pour être transformée en vapeur puis en électricité.

Les mâchefers produits peuvent être valorisés selon leurs caractéristiques physico-chimiques en remblais routier. Les ferrailles sont acheminées vers une usine de

recyclage des métaux. Et les résidus de combustion sont enfouis après exportation dans des installations spécialisées (Figure 130).

Sc1: Incinération et production d'électricité

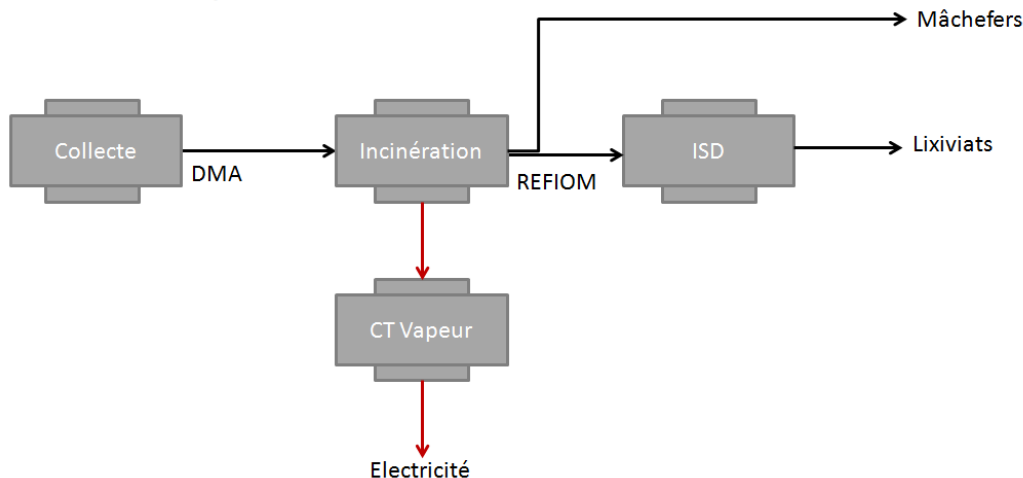


Figure 130 : Présentation du scénario Sc1

Sc2 : Scénario ISD/ Centrale thermique :

Les déchets ménagers sont conduits à l'ISDND afin d'être enfouis. Le biogaz produit par les déchets fermentescibles est récupéré et transformé en électricité. Et les lixiviats produits sont épurés et réutilisés sur site. Il s'agit du schéma actuel de gestion des déchets à la Réunion (Figure 131).

Sc2: ISD et Production d'électricité

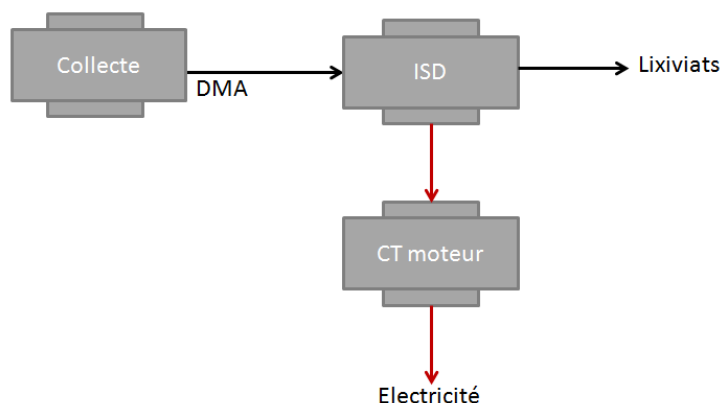


Figure 131 : Présentation du scénario Sc2

Sc3 : Scénario Incinération/ISD/ Centrale thermique/ ISD :

Dans ce scénario, une partie des DMA est traitée par incinération et une autre par ISD. Comme précédemment les refus d'incinération sont exportés pour être éliminés en ISDD et ISDI et les mâchefers et ferrailles revalorisés respectivement en remblais localement et en usine de recyclage après exportation. Pour les lixiviats d'ISD ils sont épurés et réutilisés sur place.

Dans les deux cas, une valorisation énergétique est effectuée par transformation en électricité de la chaleur pour l'incinération et du biogaz pour l'ISD (Figure 132).

Sc3: Scénario mixte « ISD et Incinération » pour la production d'électricité

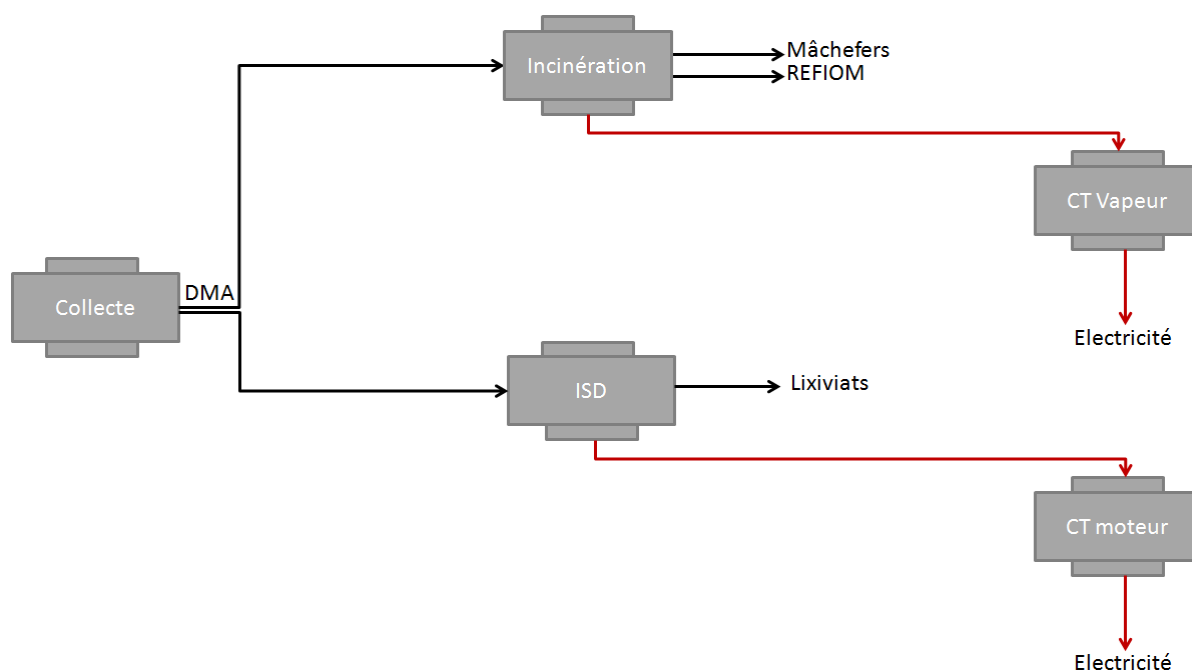


Figure 132 : Présentation du scénario Sc3

Sc4 : Scénario Méthanisation/gazéification/centrale thermique/ISD :

Les biodéchets une fois triés, sont introduits dans une unité de méthanisation transformant le biogaz produit en électricité et en chaleur selon un processus de cogénération. La cogénération produit environ 38% d'électricité et 47% de chaleur. L'électricité produite est directement injectée dans le réseau d'EDF via une centrale thermique.

Le digestat issu de la méthanisation est introduit dans une unité de gazéification. Le syngaz produit est transformé en électricité et en chaleur via une unité de cogénération. Comme ci-dessus l'électricité produite est injectée dans le réseau.

Les biochars issus de la gazéification subissent à leur tour une transformation sous forme de pellets, de granulés afin de servir de combustibles « de substitution au charbon » dans les centrales thermiques de l'île.

Environ 20 à 30% de la chaleur produite par les différents modes de traitement sont utilisés pour les besoins en chaleur des digesteurs ou des gazéificateurs. Le reste pourrait être utilisé pour les besoins en eau chaude sanitaire des bâtiments.

Les résidus de traitement sont dirigés vers l'ISD pour être éliminés (Figure 133).

Sc4: Utilisation de l'ISD et Production d'électricité

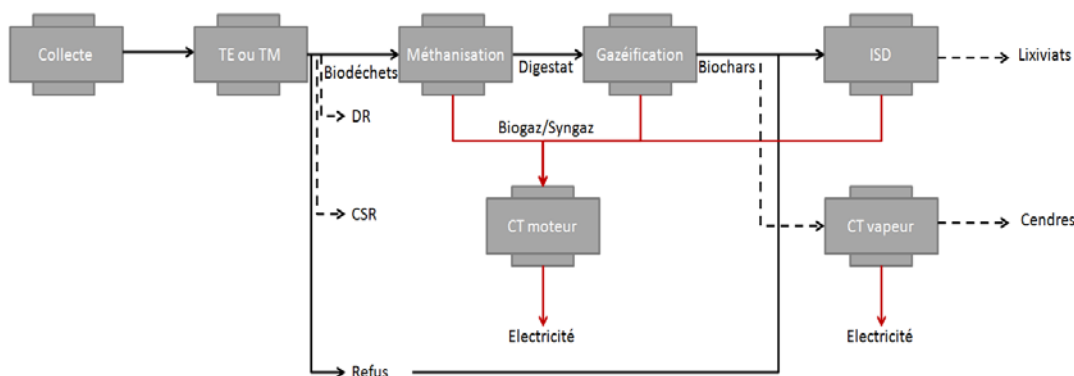


Figure 133 : Présentation du scénario Sc4

Sc5 : Scénario Méthanisation/gazéification/centrale thermique/incinération :

Ce scénario fonctionne de la même manière que Sc4 à l'exception que les résidus de production sont acheminés vers l'incinération (Figure 134).

Sc5: Utilisation de l'incinération et Production d'électricité

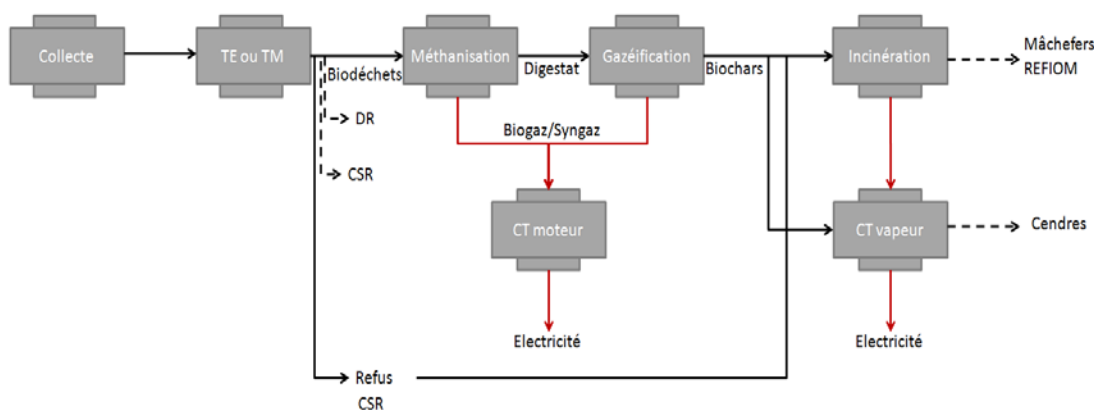


Figure 134 : Présentation du scénario Sc5

III.1.4.2 Les scénarii de valorisation en carburant

Les scénarii construits pour les besoins en carburant sont classés selon deux groupes :

- Un groupe produisant en plus de l'électricité
- Et un groupe produisant en plus un amendement organique

III.1.4.2.1 Les scénarii produisant du carburant

Cette série de scénarios se base sur le même principe que pour les scénarios Sc4 et Sc5 à la différence qu'au lieu de produire de l'électricité avec le biogaz et le syngaz, on les utilise pour produire du biocarburant de deuxième génération.

Sc6 et Sc7: Scénario Méthanisation/Gazéification/Upgrading/ ISD ou incinération :

Les biodéchets une fois triés, sont digérés par méthanisation où le biogaz produit est upgradé puis conditionné pour être utilisé comme biocarburant.

Le digestat produit est introduit dans une unité de gazéification où le syngaz produit est transformé en biocarburant de deuxième génération.

Les biochars issus sont alors conditionnés sous forme de granulés pour être injectés dans les centrales thermiques pour générer de l'électricité.

Les éventuels résidus sont enfouis dans le Sc6 et incinérés dans le Sc7 (Figure 135).

Sc6 et Sc7: Utilisation respective de l'ISD et de l'incinération / Production de Biocarburant ou GN ou Hydrogène

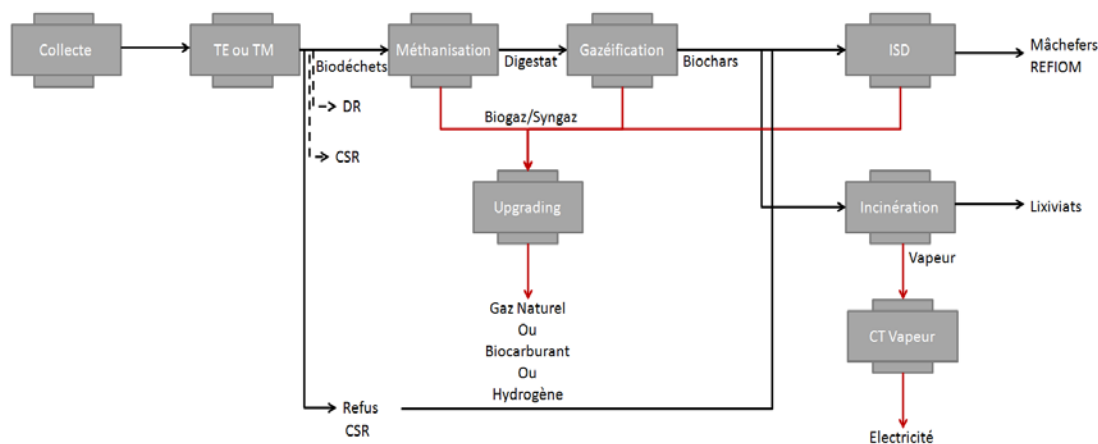


Figure 135 : Présentation des scénarios Sc6 et Sc7

III.1.4.2.2 Les scénarii produisant du carburant et/ou de l'électricité et de l'amendement minéral

Les scénarios identifiés s'organisent comme les scénarios Sc6 et Sc7 à la différence que dans la mesure du possible aucune intervention de l'ISD ou de l'incinérateur n'est nécessaire.

Sc8 : Scénario Méthanisation/gazéification/TPC :

Ce scénario est particulier puisqu'il ne propose aucune valorisation énergétique si ce n'est que pour la consommation propre à l'installation. Les digestats sont introduits dans l'unité de gazéification. Et les biochars produits sont traités par TPC (Figure 136).

Sc8: Utilisation du TPC/ Production d'amendement minéral sans valorisation énergétique

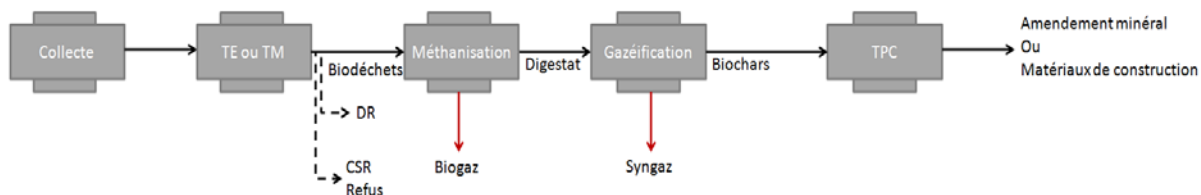


Figure 136 : Présentation du scénario Sc8

Sc9 : Scénario Méthanisation/ Gazéification/ Centrale thermique/ TPC :

Le biogaz produit par méthanisation est valorisé en électricité via la centrale thermique tandis que les biochars produits par gazéification sont traités par TPC. Ce procédé permet de neutraliser les éventuels métaux lourds présents dans les résidus et ainsi éliminer tous problèmes de pollution pour l'environnement (Figure 137).

Sc9: Utilisation du TPC/ Production d'amendement minéral ou de matériaux de construction avec valorisation énergétique

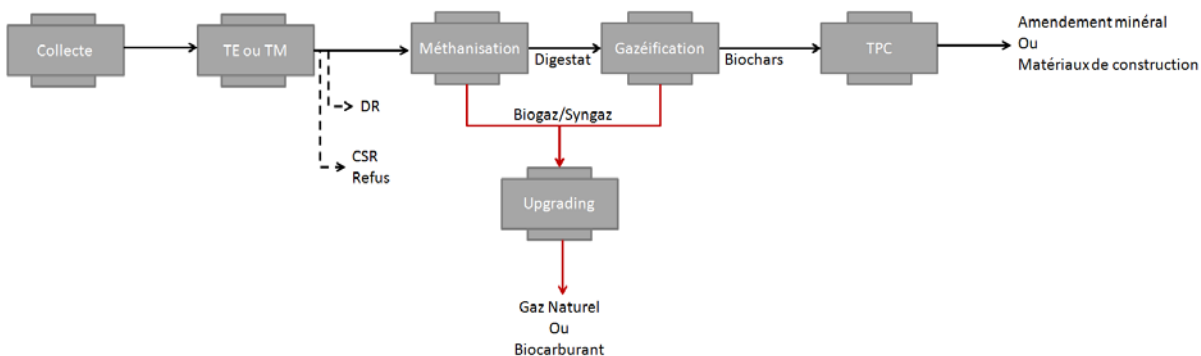


Figure 137 : Présentation du scénario Sc9

Sc10 : Scénario Méthanisation/ Gazéification/ Upgading/ TPC :

Les biochars de combustion sont acheminés vers le procédé de traitement physico-chimique pour produire un amendement minéral pour les cultures agricoles (Figure 138).

Sc10: Utilisation du TPC/ Production d'amendement minéral ou de matériaux de construction avec valorisation électrique

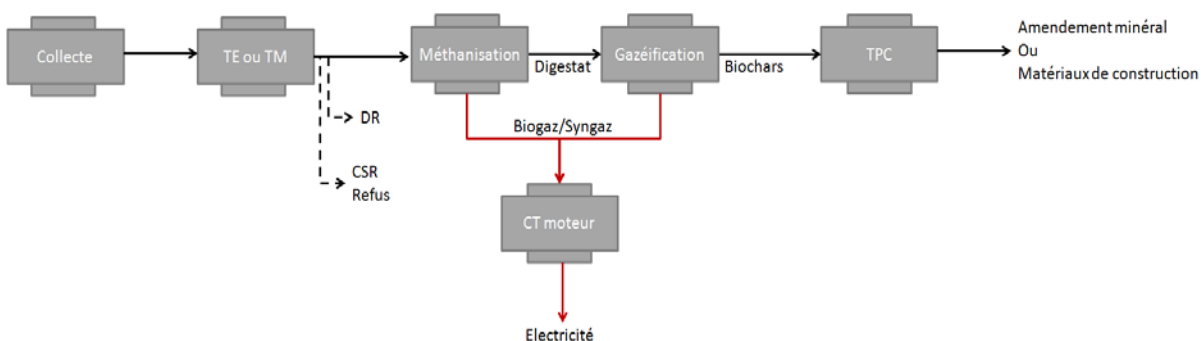


Figure 138 : Présentation du scénario Sc10

Sc11 : Scénario Méthanisation/ Gazéification/ Centrale thermique/ Upgrading/ TPC :

Ce scénario propose une double valorisation énergétique du biogaz et du syngaz à la fois en électricité et en biocarburant. Le biogaz issu de la méthanisation est transformé en électricité tandis que le syngaz issu de la gazéification est transformé en biocarburant. De plus, tous les résidus sont valorisés par TPC pour être épandus.

Les scénarii produisant des amendements organiques directement issus de la méthanisation ou de la gazéification ont été volontairement écartés suite aux constats, qu'il est difficile de normaliser ou d'homologuer les digestats ou cendres du fait de la présence d'ETM.

De ce fait, il serait intéressant dans ces scénarios d'étudier l'action de la combustion sur ces éléments traces métalliques. Nous avons préféré considérer le procédé TCP qui semble pallier à ces problèmes de normes en répondant aux besoins en minéraux des cultures et en neutralisant les métaux lourds.

Il est important de noter que les Sc10 et Sc11 peuvent être développés à d'autres fins que celle de production de biocarburant ou d'électricité. En effet, la méthanisation permet à partir des biodéchets de produire du gaz naturel après avoir upgradé le biogaz. Ce gaz naturel peut être compressé et embouteillé pour être utilisé comme gaz de cuisson et ainsi se substituer le butane importé.

Les digestats permettent par gazéification la production d'éléments primaires comme l'hydrogène. Cet hydrogène conditionné en bouteille peut être utilisé dans des piles à combustibles pour la production d'électricité.

Et les biochars de combustion sont détournés vers une valorisation TPC pour produire un matériau de construction dans le domaine du BTP (Figure 139).

Sc11: Utilisation de l'incinération ou de l'ISD / Production d'amendement minéral ou de matériaux de construction avec valorisation énergétique et électrique

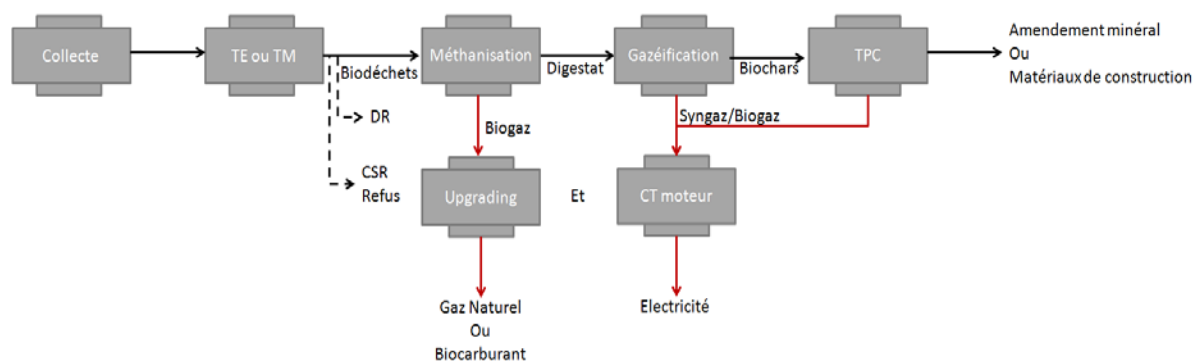


Figure 139 : Présentation des scénarios Sc11

Sc12 et Sc13 : Scénario Méthanisation/ Gazéification/ Centrale thermique/ Upgrading / Incinération ou ISD :

Il s'agit du même scénario que précédemment dans lequel on substitue le TPC respectivement par l'incinération et par l'ISD (Figure 140).

Sc12 et Sc13: Utilisation de l'incinération ou de l'ISD / Production d'amendement minéral ou de matériaux de construction avec valorisation énergétique et électrique

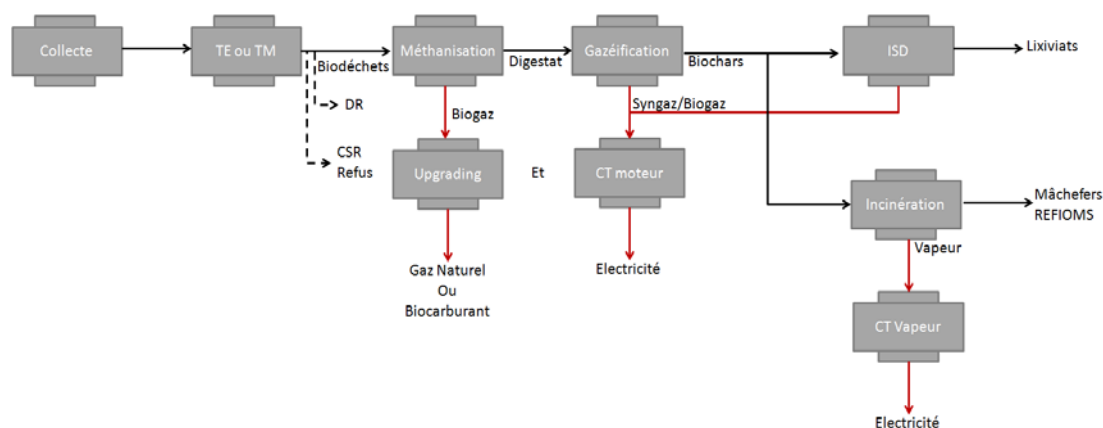


Figure 140 : Présentation des scénarios Sc12 et Sc13

Nous avons pu voir jusqu'à présent qu'une multitude de scénarios étaient possibles selon les besoins identifiés. A ces scénarios, nous pouvons également ajouter le choix entre des modes : de prétraitement enzymatique ou de tri mécanique, créant ainsi des variantes supplémentaires dans la considération des scénarios. L'étape suivante consiste donc à identifier les critères d'évaluation afin de permettre le classement de ces scénarios du plus favorable au moins favorable.

III.2 Calibrage des paramètres : Acquisition des données

III.2.1 Présentation des critères

Comme précédemment une liste de critères identifiés dans la littérature est considérée afin d'établir un classement des alternatives, ici les scénarios (Rojo). Cette liste comprend 15 critères à partir de laquelle, nous effectuerons un certain nombre de choix. La liste est la suivante :

- 1) Quantité de rejets à enfouir : les rejets en enfouissement sont un facteur important traduisant l'efficacité de valorisation de l'installation. Plus les rejets sont élevés moins le critère sera préféré.
- 2) Coût/capacité : Le rapport coût capacité permet d'avoir un aperçu de la rentabilité de la filière au travers des coûts totaux de la filière ramenés à la capacité.
- 3) Production d'énergie : La production d'énergie de l'installation est signe d'un bon fonctionnement dans une optique d'atteindre l'autonomie énergétique. Plus la production d'énergie est élevée plus le critère sera préféré.
- 4) Energie consommée : Il s'agit de l'énergie nécessaire au fonctionnement de l'installation. Plus l'installation est énergivore moins le critère est préféré.
- 5) Revalorisation matière : Les installations de traitement produisent des matières valorisables comme le compost qu'il est intéressant de quantifier. Plus cette production est élevée moins le critère est préféré. Les valorisations matières présentent en général une plus-value et ainsi des recettes

supplémentaires à ajouter au bon fonctionnement de l'installation de traitement. Néanmoins, elles nécessitent une gestion accrue et raisonnée compliquant ainsi le système de gestion. De ce fait, moins il y a de matières à gérer plus le plus critère est préféré.

- 6) Emprise au sol : au vu des faibles disponibilités de surfaces en milieu insulaire, il est important de prendre en considération ce facteur. Plus une surface est élevée moins le critère sera préféré. Cette observation est toutefois à coupler avec les critères de productivité d'énergie, de quantité à gérer, de coûts, de revente, et de choix de technologie.
- 7) Technologies utilisées : certaines technologies sont préférées à d'autres, c'est pourquoi nous avons mis en place d'une échelle de cotation des technologies. Plus la note est forte plus la technologie aura un impact négatif sur son environnement.
- 8) Emission de GES : dans une éthique environnementale, il est important de considérer les effets sur la qualité de l'air des infrastructures de traitement considérées. Plus les GES sont élevés moins le critère sera préféré.
- 9) Nuisances sonores : une infrastructure de traitement des déchets peut engendrer des nuisances sonores notamment par le passage répétitif des camions. Par conséquent, dans un respect du voisinage, plus les passages sont fréquents moins le critère sera préféré.
- 10) Pollution visuelle : une unité de traitement peut émettre des fumées, de la vapeur ou un stockage de produits. Plus cette pollution est visible moins le critère sera préféré.
- 11) Les coûts : les coûts retenus sont, les coûts de collecte, de maintenance, d'amortissement du matériel, de fonctionnement liés à l'énergie et aux opérateurs et les coûts d'investissement de l'infrastructure. Plus les coûts sont élevés moins le critère sera préféré.
- 12) Bénéfices des ventes : les bénéfices considérés sont la vente de l'énergie produite sous forme de biogaz, syngaz et la vente de produits induits matière comme le compost, l'amendement minéral et autres produits matières. Ils permettent de cibler la rentabilité économique de l'installation. Plus les bénéfices sont élevés plus le critère sera préféré.
- 13) L'acceptabilité sociale : syndromes développés autour de certains modes de traitement engendrant un mal être et un ressenti négatif impactant leurs valeurs et les activités du citoyen.
- 14) La technicité : l'implantation de nouvelles technologies sur un territoire nécessite d'avoir des compétences locales afin de permet le bon fonctionnement de l'unité. De ce fait, des niveaux d'études seront à développer pour l'implantation de nouvelles installations de traitement

apportant ainsi une plus-value au territoire. Plus celle-ci nécessite des compétences plus elle est préférée.

15) La création d'emplois : le nombre de postes créés par le développement d'opérations de traitement.

La Figure 141 présente la synthèse des critères et leur classement par catégorie afin de faciliter leur organisation.

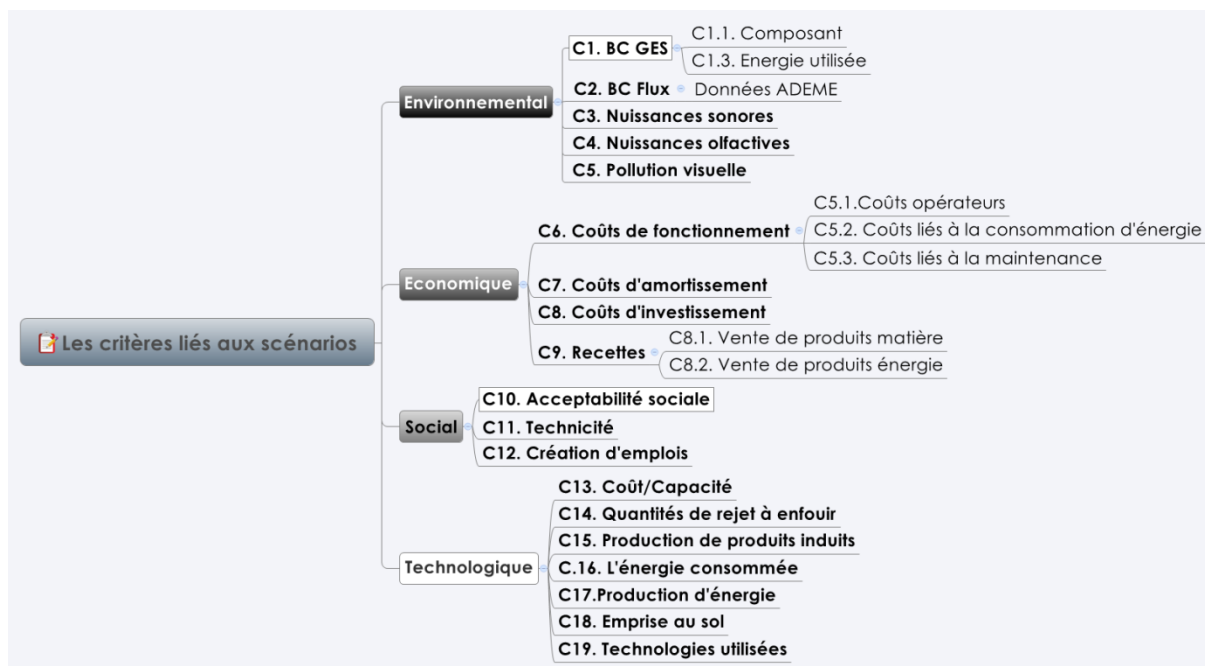


Figure 141 : L'organisation des critères liés aux scénarios

III.2.2 Présentation du tableau des performances

Les Tableau 55 et Tableau 56 présentent les évaluations des scénarios en fonction des critères retenus et présentés ci-dessus. Pour chaque critère, les calculs ou données considérées sont exposés, à savoir que chaque scénario est évalué selon la même méthode pour un critère donné.

Lorsque les valeurs associées aux critères sont mesurables et pertinentes, nous considérons une approche numérique par calculs ou données statistiques dans le cas contraire, nous considérons des échelles d'évaluation faisant appel à un jugement "plus instinctif".

Dans le cas, où les valeurs d'entrées sont disponibles, nous reprenons les formules d'évaluation présentées au chapitre 3 (III.1.1).

III.2.2.1 Les critères environnementaux : C1 et C2 : Les émissions de GES

Les émissions de GES sont estimées à partir de l'analyse des flux, des composants, de l'énergie utilisée et des émissions évitées liées à la production d'énergie renouvelable. Cette évaluation s'effectue comme suit :

1) C1 : Le bilan carbone total :

$$BC_{\text{système}} = BC_{\text{composant}} + BC_{\text{énergie}}$$

2) C2 : Le bilan carbone du flux :

$$BC_{\text{flux}} = FE \times Q_d$$

Avec,

Q_d , la quantité de déchets

FE , facteur d'émission lié au flux de l'ADEME.

III.2.2.2 C3, C4 et C5 : Les nuisances

Les nuisances qu'elles soient sonores, olfactives ou visuelles sont estimées à l'aide d'échelle d'évaluation allant de 1 à 5. Plus les nuisances seront considérées comme fortes et pénibles moins le critère sera noté. Une nuisance forte sera donc associée à une échelle de 1 tandis que des nuisances acceptables et faibles seront associées à une échelle de 5. Pour cette évaluation, les technologies identifiées dans les scénarios ont été classées selon un point de vue d'expert comme suit (Figure 142) :

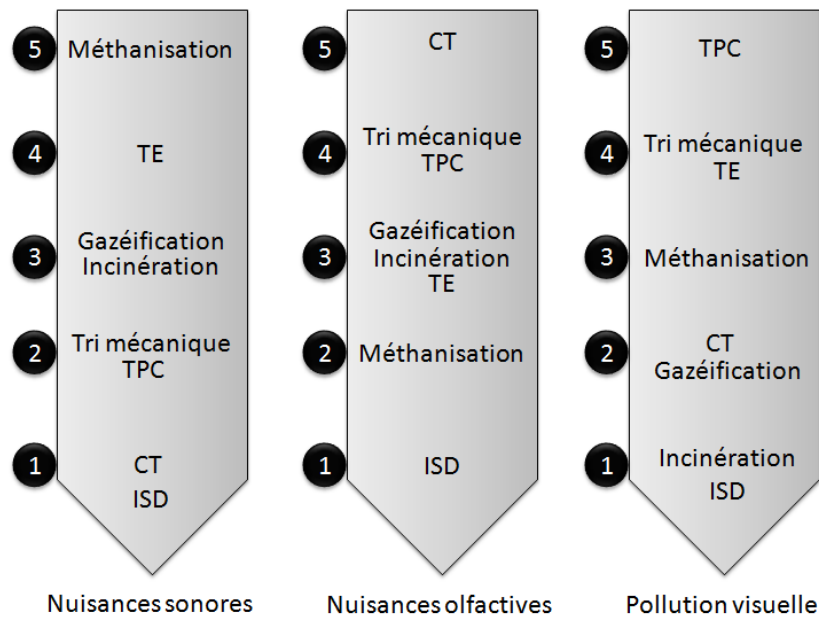


Figure 142 : Echelles d'évaluation des nuisances environnementales

Tableau 55 : Présentation de la construction du tableau de performance pour les critères : environnemental et économique

Catégories	Environnemental					Economique			
Critères	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
	BC GES système (t éq C)	BC flux (t éq C)	Nuisances sonores	Nuissances olfactives	Pollution visuelle	Fonctionnement (€/an)	Amortissement (€/an)	Investissement (€/an)	Recettes (€/an)
	Outil de simulation	Données ADEME	Echelle	Echelle	Echelle	Outil de simulation	Outil de simulation	Outil de simulation	Outil de simulation
Sc1	BC composant + BC énergie utilisée	FE ADEME X Q	Echelle d'évaluation de 1 à 5	Echelle d'évaluation de 1 à 5	Echelle d'évaluation de 1 à 5	Coût maintenance+ coût opérateur+ coût énergie	(Coût d'achat du composant x coût d'installation) / DV	Coût de la construction	Prix unitaire du produit x Q
Sc2									
Sc3									
Sc4									
Sc5									
Sc6									
Sc7									
Sc8									
Sc9									
Sc10									
Sc11									
Sc12									
Sc13									

Tableau 56: Présentation de la construction des tableaux de performance pour les critères : social et technologique

Catégories	Social			Technologique						
	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19
Critères	Acceptabilité de la population	Technicité	Création d'emplois (nombre)	Coût/Capacité (€/t)	Quantité de rejets à enfouir (%)	Revalorisation matière (tonnes/an)	Energie consommée (kWh/an)	Production d'énergie (kWh/an)	Emprise au sol (ha)	Technologies utilisées
	Echelle	Données	Outil de simulation	Outil de simulation	Outil de simulation	Outil de simulation	Outil de simulation	Outil de simulation	Outil de simulation	Echelle
Sc1 Sc2 Sc3 Sc4 Sc5 Sc6 Sc7 Sc8 Sc9 Sc10 Sc11 Sc12 Sc13	Echelle d'évaluation de 1 à 5	Echelle d'évaluation de 1 à 5	Estimation du nombre de personnel	Coût / Capacité de l'installation	Selon les modes de traitement présents au sein du scénarios des ratios de production seront proposés pour quantifiés les produits induits et refus		Pw x t	PCI X Rd électrique	Σ des dimensions de tous les composants intégrant un facteur surfacique	Echelle d'évaluation de 1 à 8

Figure 143 : Présentation de la construction du tableau de performance pour les critères : environnemental et économique

Prenons l'exemple d'une ISD:

- Les allers-retours permanent des camions sur le site engendrent une nuisance sonore élevée, l'échelle associée sera donc 1 ;
- L'entassement de quantités élevées de déchets entraîne l'émission d'odeurs fortes. Ce critère sera donc évalué à 1 ;
- Les alvéoles en cours d'exploitation ne sont pas couvertes occasionnant une dégradation visuelle du site. Ce critère sera donc évalué à 1.

III.2.2.3 Les critères économiques : C6, C7, C8 et C9 :

Les coûts sont estimés au travers des coûts de maintenance, de fonctionnement, d'amortissement, d'investissement et par les recettes engendrées par l'activité.

1) C6 : Les coûts de fonctionnement :

$$C_F = C_{\bar{e}} + C_m + C_{op}$$

Avec,

$C_{\bar{e}}$, la consommation d'énergie en kWh/jrs,

C_m , le coût de maintenance (€/an),

C_{op} , le coût des opérateurs (€/an).

Où,

$$C_{op} = C_{ha} \times Nb_{op}$$

C_{ha} , le coût horaire annuel d'un opérateur,

Nb_{op} , le nombre d'opérateurs.

2) C7 : Les coûts d'amortissement :

$$C_A = \frac{C_u + C_i}{DV}$$

C_A , le coût d'amortissement du composant sur la durée de vie (€),

C_u , le coût d'achat du composant (€),

C_i , le coût de l'installation du composant (€),

DV, la durée de vie du composant.

3) C8 : Les coûts d'investissement :

Les coûts d'investissement sont estimés dans l'outil en fonction de la capacité de traitement de la filière. Il prend l'achat des équipements et du matériel ainsi que la construction de la structure. Plus les coûts sont élevés moins le critère sera préféré.

4) C9 : Les recettes de la vente des produits :

Les recettes liées à la vente de produits correspondent à la vente des produits issus de l'unité de traitement tel que les métaux, le compost, l'électricité (biogaz), les recyclables et les combustibles de substitution (CSR). Les recettes s'apparentent à la recette annuelle d'exploitation (€HT/t) et s'écrit comme suit :

$$R_t = R_{\text{amendement}} + R_{\text{métaux}} + R_{\text{biogaz}} + R_{\text{CSR}} + \dots$$

$$R_{\text{amendement}} = Q_c \times p_a$$

$$R_{\text{métaux}} = Q_m \times p_m$$

$$R_{\text{biogaz}} = Q_{AD} \times p_e$$

$$R_{\text{CSR}} = Q_{\text{CSR}} \times p_c$$

Avec,

R_t , les recettes annuelles d'exploitation (€HT/an),

$R_{\text{amendement}}, R_{\text{métaux}}, R_{\text{biogaz}}, R_{\text{CSR}}$, les recettes pour les différents produits induits (€/an)

Q , est la quantité des différents produits induits (t/an ou kWh/an),

p , le prix de vente unitaire des différents produits induits (€/t ou €/kWh).

III.2.2.4 Les critères sociaux : C10, C11 et C12

1) C10 : L'acceptabilité sociale :

Pour l'évaluation de l'acceptabilité sociale, nous considérons une échelle d'évaluation allant de 1 à 5. Prenons pour exemple l'incinération. Ce mode de traitement est très mal jugé par la population, de ce fait, il sera moins préféré au vu des autres modes de traitement et sera noté à une échelle de 1. La notation de cette échelle est basée selon le même principe que pour les émissions de GES (C1) comme suit (Figure 144) :

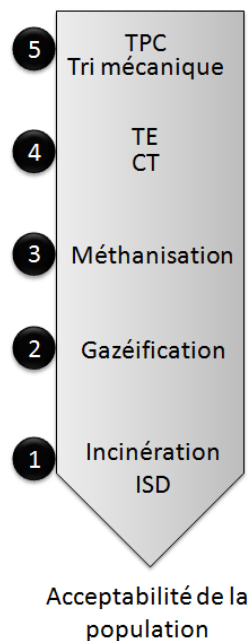


Figure 144 : Echelle d'évaluation de l'acceptabilité de la population

2) C11 : La technicité :

La technicité apporte une plus-value au territoire en permettant l'élargissement des possibilités locales en termes d'études et de formations. Elle permet au territoire un

certain développement économique au travers des technologies et compétences nécessaires à l'activité. Elle est déterminée comme précédemment selon une échelle d'évaluation allant de 1 à 5. Plus la technicité est élevée, moins le critère est noté et inversement. Une bonne technicité sera notée 1 et une technicité moindre 5 (Figure 145).

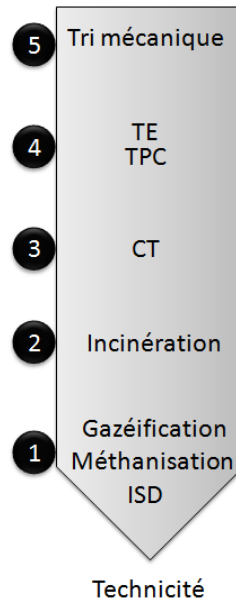


Figure 145 : Echelle d'évaluation de la technicité

3) C12 : Création d'emplois :

Des données d'entrées sont disponibles pour certains modes de traitement comme l'incinération qui nécessite 30 personnes pour fonctionner 24h/24h, 7jrs/7jrs. Par conséquent, il nous est possible de proposer des ratios permettant une estimation des emplois pour chacun des modes considérés. Par ailleurs, l'outil de simulation permet d'entrer ces données très précisément pour chacune des Opérations Unitaires.

III.2.2.5 Les critères technologiques de C12 à C15

1) C13 : Coût/capacité :

Ce critère correspond au rapport entre le coût total de la filière sur la capacité. Il nous permet d'avoir un aperçu du coût à la tonne et par conséquent de la rentabilité de la filière.

2) C14 et C15 : La quantité de rejet à enfouir et la production de produits induits :

Certains ratios sont disponibles selon le mode de traitement. Ces ratios permettent la généralisation à tous les modes de traitement selon un ratio de déchets entrants engendre la production de xt de produits induits. De plus, l'outil de simulation propose d'entrée toutes ces données dans l'UF traitement des produits induits.

3) C16 : L'énergie consommée :

L'énergie consommée est déterminée dans l'outil de simulation. Plus cette consommation est élevée, moins le critère est préféré.

4) C17 : La production d'énergie:

La production d'énergie est calculée dans l'outil de simulation. Plus elle est élevée, plus le critère sera préféré.

5) C18: L'emprise au sol :

L'emprise au sol se détermine au sein de l'outil de simulation entrant les paramètres de dimensionnement au niveau de chaque composant permettant ainsi une approche très précise des surface nécessaires. Plus l'emprise au sol est élevée moins le critère sera préféré.

6) C19 : la technologie utilisée :

Pour ce critère, une échelle d'évaluation est mise en place. Pour les technologies, l'échelle se compose de 7 niveaux, un niveau pour chaque mode de traitement permettant ainsi leur classement du plus favorable au moins favorable.

Les échelles d'évaluation proposées tout au long de cette partie sont arbitraires et peuvent donc se composer différemment selon l'observateur. Nous évaluons les technologies comme présenté Figure 146.

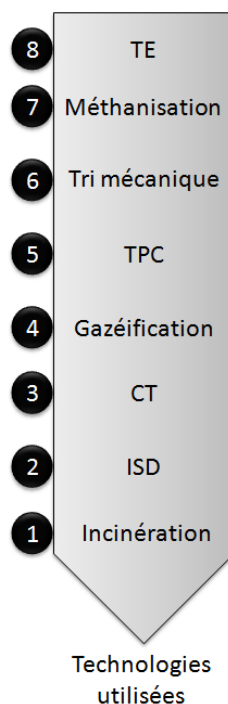


Figure 146 : Echelle d'évaluation de la technologie utilisée

III.2.3 **Pondération des critères pour l'évaluation des scénarios**

La pondération des critères pour le classement des scénarios se présente comme pour l'évaluation des sites potentiels. Cependant, nous avons choisi au vu des critères de modifier quelques peu les hypothèses de base afin de proposer trois évaluations spécifiques autour des trois piliers fondamentaux du développement durable à savoir :

- 1) une hypothèse de pondération environnementale accès sur la majoration des critères environnementaux ;
- 2) une hypothèse de pondération sociale accès sur la majoration des critères sociaux ;
- 3) une hypothèse de pondération économique accès sur la majoration des critères économiques.

La mise en place de telles Hypothèses, nous permettra d'avoir un aperçu des classements en fonction de ces repères qui dans le cas d'une aide à la décision sont beaucoup parlant et instinctifs.

Pour cela, nous construisons 9 hypothèses dont trois concernant les piliers du développement durable, deux extrêmes de 0% à 100% pour le critère limitant, un scénario à part égales et deux scénarios intermédiaires (Tableau 57).

Tableau 57 : Hypothèse de pondération des scénarios de gestion et de traitement

Hypothèses	Pondérations
Hypothèse 1	Tous les critères ont la même pondération
Hypothèse 2	100% Facteur limitant (FL)- 0% autres critères
Hypothèse 3	75% FL – 25% autres critères
Hypothèse 4	50% FL – 50% autres critères
Hypothèse 5	25% FL – 75% autres critères
Hypothèse 6	0% FL – 100% autres critères
Hypothèse 7	50% critères environnementaux – 50% autres critères
Hypothèse 8	50% critères sociaux – 50% autres critères
Hypothèse 9	50% critères économiques – 50% autres critères

Dans le cas des pondérations concernant les scénarios, nous avons choisi de considérer la quantité de rejets comme le critère limitant. En effet, pour toutes les filières de traitement des déchets, l'organisation de la chaîne de gestion s'articulera autant sur les entrants que sur les extrants. Par conséquent, ce critère semble être un bon compromis afin d'orienter les classements vers des scénarios de gestion raisonnée des déchets.

III.2.4 Proposition de scénarios de gestion au travers du logiciel Visual PROMETHEE

Les tableaux de performance sont présentés dans les Tableau 58 et Tableau 59. Ces tableaux présentent les valeurs utilisées pour le classement des scénarios. Comme introduits précédemment ces valeurs sont issues de l'outil de simulation. L'acquisition de données ainsi entrées au niveau des composants est ensuite remontée dans les différents niveaux d'observation supérieurs.

Afin de mieux appréhender les classements proposés par PROMETHEE, nous avons synthétisé sur un graphique le rang obtenu pour chaque scénario en fonction de chacune des hypothèses de pondération (Figure 147).

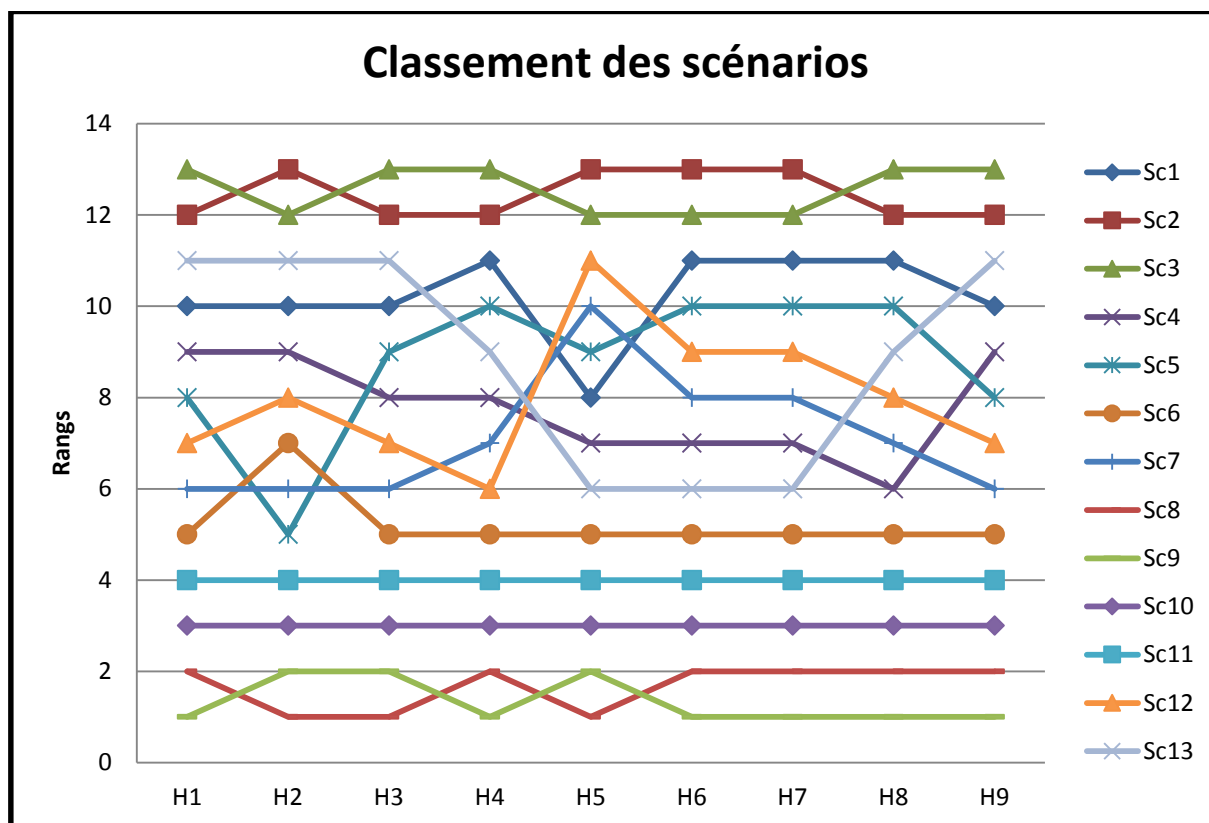


Figure 147 : Synthèse des classements obtenus pour chaque scénario et pour chaque Hypothèses

Tableau 58 : Tableau de performance des scénarios pour les critères : environnemental et économique

Catégories	Environnemental					Economique			
Critères	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
	BC GES système (t éq C)	BC flux (kg éq C)	Nuisances sonores	Nuissances olfactives	Pollution visuelle	Fonctionnement (€/an)	Amortissement (€/an)	Investissement (€/an)	Recettes (€/an)
Sc1	95	986,38	3	3	1	21 000 000,00 €	16 017 815,00 €	280 000 000,00 €	19 000 000,00 €
Sc2	135	1201,63	1	1	1	12 500 000,00 €	25 000 000,00 €	200 000 000,00 €	1 400 600,00 €
Sc3	112	630,30	1,5	2,5	1	29 500 000,00 €	37 000 000,00 €	410 000 000,00 €	9 500 000,00 €
Sc4	40	563,22	2	2	2	5 500 000,00 €	11 000 000,00 €	60 000 000,00 €	4 200 000,00 €
Sc5	36	498,64	2,5	3	2	6 300 000,00 €	9 000 000,00 €	70 000 000,00 €	6 100 000,00 €
Sc6	66	578,22	1,5	2	2	1 900 000,00 €	3 000 000,00 €	21 000 000,00 €	5 600 000,00 €
Sc7	70	513,64	2,5	3	2	3 700 000,00 €	6 500 000,00 €	41 000 000,00 €	7 300 000,00 €
Sc8	38	264,85	3,5	2,5	4	545 000,00 €	850 000,00 €	6 000 000,00 €	4 215 000,00 €
Sc9	40	265,85	3	4	2,5	545 000,00 €	850 000,00 €	6 000 000,00 €	4 215 000,00 €
Sc10	70	279,85	3	4	2,5	2 500 000,00 €	3 900 000,00 €	27 500 000,00 €	4 900 000,00 €
Sc11	71	280,85	1,5	4	3	2 500 000,00 €	3 900 000,00 €	27 500 000,00 €	4 600 000,00 €
Sc12	75	514,64	2	3	1,5	2 800 000,00 €	4 500 000,00 €	31 500 000,00 €	7 400 000,00 €
Sc13	80	579,22	1	2	1,5	2 800 000,00	4 500 000,00	31 502 000,00	5 800 000,00 €

Tableau 59 : Tableau de performance des scénarios pour les critères : social et technologique

Catégories	Social			Technologique						
Critères	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19
	Acceptabilité de la population	Technicité	Création d'emplois (nombre)	Coût/Capacité (€/t)	Quantité de rejets à enfouir (%)	Revalorisation matière (tonnes/an)	Energie consommée (kWh/an)	Production d'énergie (kWh/an)	Emprise au sol (ha)	Technologies utilisées
Sc1	1	2	30	180	2%	25%	17520000	262800000	2	1
Sc2	2	1	25	3560	100%	0%	14500000	128640000	60	1,5
Sc3	1	2	45	5200	50%	12%	22000000	130000000	62	3
Sc4	2	1	19	1950	50%	20%	12000000	105000000	10	2
Sc5	2	1,5	17	1650	25%	25%	12000000	115000000	8	3
Sc6	2	1	18	700	20%	20%	13500000	105000000	10	2
Sc7	2	1	19	1366	25%	25	13500000	136800000	8	5
Sc8	3	3	17	200	10	100%	1 500 000	78987945	7	4
Sc9	3	2,5	17	200	10	100%	1200000	78987945	8	4
Sc10	3	2	17	916	10	100%	1300000	91824658	8	4
Sc11	2	2,5	17	916	10	100%	1320000	86202740	9	2
Sc12	2	1	19	1050	25	25%	1400000	138673973	11	4
Sc13	1	1	18	1050	20	20%	1400000	108690411	12	3

Au regard des critères et des préférences émises lors de l'évaluation des critères, le classement final des scénarios selon le logiciel PROMETHEE est le suivant:

- 1) Sc9
- 2) Sc8
- 3) Sc10
- 4) Sc11
- 5) Sc6
- 6) Sc7
- 7) Sc4 et Sc12
- 8) Sc4, Sc5, Sc7 et Sc12
- 9) Sc4
- 10) Sc1 et Sc5
- 11) Sc1 et Sc13
- 12) Sc2
- 13) Sc3

A l'observation des courbes, nous pouvons constater que certains classements restent inchangés ou peu variables selon les Hypothèses de classement tandis que d'autres classements sont soumis à beaucoup plus de variations. Ces variations peuvent être vues principalement pour les rangs 7, 8 et 9.

La question qui vient immédiatement est : Pourquoi ces variations de rangs selon les hypothèses de classement. Si l'on revient aux scénarios, nous pouvons constater qu'il s'agit d'alternatives très proches utilisant tantôt la centrale thermique moteur et tantôt le upgrading plant pour la valorisation énergétique et selon les cas de figure l'incinération ou l'enfouissement pour l'élimination des refus.

III.2.4.1 Interprétation des classements au regard des scénarios

III.2.4.1.1 Interprétation des classements « variables et conflictuels »

Le scénario Sc12 :

Selon les Hypothèses de pondération, un scénario va prévaloir sur un autre et inversement, au grès de la pondération du critère limitant : prédominant ou non. Dans le cas, de Sc12, au passage de l'hypothèse H5, il est déclassé de 5 rangs plus loin. Sachant que, l'hypothèse H5 correspondant à l'évaluation « 100% pour le critère limitant : les quantités à enfouir et 0% pour les autres critères » ; et Sc12, un scénario dit mixte car combinant à la fois la production d'électricité et de biocarburant par l'utilisation d'une centrale thermique moteur et d'une unité d'upgrading.

Notons que ce scénario doit produire beaucoup de rejets qui font que son classement dans ce cas n'est pas optimal. En effet, le simple fait qu'il se compose d'une unité d'incinération suffit à expliquer ce positionnement. Nous l'avons vu en sortie d'incinération, il y a près de 25% de rejets potentiellement ultimes.

De plus, nous pouvons constater qu'il est judicieusement positionné derrière Sc5 et Sc7 qui une fois combinés forment Sc12. Par ailleurs, il est également classé après Sc13 (scénario identique mais utilisant l'ISD à la place de l'incinération), puisque l'enfouissement produit moins de rejet en comparaison à l'incinération.

Le classement de ce scénario Sc12 varie aussi pour l'hypothèse H4 correspondant au scénario économique. Lorsque l'évaluation s'effectue principalement autour des critères économiques son classement est amélioré d'un rang tandis que Sc7 et Sc5 reculent d'un rang également. Sc12, bien que composé d'un incinérateur propose également une double valorisation énergétique à la fois en l'électricité et en biocarburant. Le rendement économique de cette alternative s'en trouve alors améliorée. Tandis que Sc5 et Sc7 ne proposent qu'un seul mode de valorisation.

Le scénario Sc13 :

Prenons maintenant l'exemple de Sc13. Si l'on en croit l'allure de sa courbe, il est plutôt mal classé (rang 11). Mais dès lors que l'on considère des hypothèses de pondération favorisant le critère limitant de quantité de rejet, il progresse de 5 rangs. Nous pouvons donc dire que Sc13 produit moins de rejets, par exemple qu'il est respectueux de l'environnement et économiquement rentable. Comme pour l'exemple précédent, lorsqu'il s'agit de rejet, l'incinération se classe derrière l'enfouissement puisque plus génératrice de pollution.

Les mêmes constats peuvent se faire pour les autres scénarios présentant de fortes variations. Etant donné leurs caractéristiques proches dans l'ensemble, selon qu'ils soient plus ou moins respectueux de l'environnement ou économiquement rentable ou plus proche des considérations sociales, leurs positionnements changeront.

III.2.4.1.2 L'interprétation des classements « fixes »

Pour les autres scénarios, les classements obtenus sont plutôt de types linéaires comme pour Sc2, Sc3, Sc6, Sc8, Sc9, Sc10 et Sc11.

Les scénarios Sc2 et Sc3 :

La dualité Sc2 et Sc3, est simplement dû au fait de la présence de l'utilisation de l'ISD qui pour les Hypothèses H2 (environnement), H5 (100% CL/0% autres), H6 (75%/25%) et H7 (50%/50%). L'ISD permet au scénario de s'améliorer quelque peu au regard d'une gestion des déchets par ISD permettant à titre d'environnement de capturer le carbone dans les alvéoles.

Les scénarios Sc8 et Sc9 :

Sc8 et Sc9 sont également en duel selon les hypothèses observées notamment pour H2, H3 et H5. Dans le premier cas, il s'agit du scénario environnement, ce positionnement s'explique par le fait que le Sc9 comporte en plus de Sc8 une centrale thermique venant légèrement impacter l'émission de GES. Dans le cas de H3, le même principe se répète au vu de l'ajout d'une centrale thermique, la préférence et par conséquent l'acceptabilité s'en trouve diminuée. Et pour H5, l'ajout d'un mode de traitement engendre nécessairement des rejets supplémentaires même si dans ce cas les différences de valeurs chiffrées sont très proches.

Les scénarios Sc10 et Sc11 :

Sc10 et Sc11 sont invariables quelles que soit les hypothèses de pondération considérées. Ils se composent du mode de traitement physico-chimique qui, nous l'avons vu est peu coûteux tout en favorisant la production d'amendement minéral

ou de matériaux de construction. Le TPC a un double intérêt, à la fois la valorisation matière des extrants des procédés de méthanisation et de gazéification mais également un coût/capacité intéressant. De plus du fait de son faible impact environnemental, il répond aux critères sociaux facilitant son acceptation par la population.

Le scénario Sc6 :

Les scénarios utilisant l'enfouissement à la place de l'incinération présentent de manière générale une notation environnementale moindre. De ce fait, Sc6 est déclassé d'un rang pour l'Hypothèse de pondération considérant l'environnement. Concernant les autres critères, le classement est invariable. Il semble évident que de la même façon que précédemment l'incinération sera toujours classée après l'enfouissement.

Maintenant que nous avons pu analyser et comprendre les classements des scénarios, nous pouvons discuter ces classements sur la base des données chiffrées du tableau de performances et de notre propre perception du sujet.

III.2.4.2 Discussion des classements obtenus

Le classement final des scénarios repose sur les critères sélectionnés et sur les préférences émises pour chacun d'eux. De ce fait, au travers des différentes Hypothèses, nous avons orienté les résultats de l'analyse selon différents points de vue, à savoir suivant :

- 1) Les aspects environnementaux,
- 2) Les aspects sociaux,
- 3) Les aspects économiques,
- 4) Et suivant une variation du critère limitant classé dans les aspects techniques purement liés à la filière de traitement.

Nous proposons ici, d'interpréter ce classement général en considérant notre propre approche du problème et ainsi d'observer les recoupements.

En première position, nous obtenons le scénario Sc9. Celui-ci propose de gérer les extrants des différentes unités de traitement par TPC. Ce système est d'un point de vue économique peu cher au vu des installations utilisées en parallèle dans les autres scénarios comme l'incinération et l'enfouissement. De plus, il propose une valorisation matière des extrants par neutralisation des métaux lourds permettant ainsi son épandage sur les cultures ou selon les besoins. Sa densité lui confère en outre une texture facilitant son emploi dans le domaine du BTP.

A ce stade, il présente aussi bien des avantages économiques qu'environnementaux. De plus, dans la mise en œuvre de nos échelles d'évaluation concernant les critères sociaux, nous avons considéré qu'un tel procédé serait bien accueilli par la population du fait qu'il ne s'agit pas d'un procédé de combustion (exempte de fumées) et avec un faible besoin en capacité puisqu'en bout de chaîne de gestion. Le TPC se trouve donc bien classé pour ces trois piliers du développement durable.

Face à ce constat, il semble tout naturel qu'il soit positionné en première place. Néanmoins, il est à noter que ce procédé, bien adapté pour le traitement des extrants ne constitue pas une aussi bonne alternative pour le traitement des déchets primaires. En effet, ce procédé a besoin de chaux afin de neutraliser la matière. En gestion des extrants, les quantités entrantes dans le TPC sont de l'ordre de 3000 t/an. Or dans le cas de traitement des déchets primaires, la quantité à gérer serait 10 à 13 fois plus importantes. Cela signifie que l'importation de chaux nécessaire pour le procédé serait également 10 à 13 fois plus élevée grevant ainsi les aspects environnementaux et économiques.

Les scénarios élaborés ont donc été réfléchi dans un certain ordre d'apparition dans la chaîne de gestion toujours dans cet objectif de gestion raisonnée.

C'est alors tout naturellement que les scénarios intégrant ce procédé se suivent dans le classement avec Sc8, Sc10 et Sc11 respectivement en deuxième, troisième et quatrième position. Sc8 considère uniquement le TPC pour le traitement des extrants accés uniquement sur une valorisation matière. Tandis que Sc10 et Sc11 propose en plus une valorisation énergétique qui est doublée dans Sc11 (scénario mixte valorisant l'énergie sous forme d'électricité et de biocarburant).

Ce classement s'opère toujours selon le même principe à savoir que Sc9 est mieux classé que Sc8 puisqu'il propose une valorisation en électricité des biogaz et syngaz issus de la méthanisation et de la gazéification. Cette valorisation électrique engendre des recettes supplémentaires liée à la vente de cette énergie. De plus dans nos valeurs, nous avons considéré qu'une centrale thermique moteur est peu consommatrice en énergie et peu polluante. De ce fait, ces légères variations ne suffisent pas à déclasser Sc9 en deuxième position.

Sc8 est mieux classé que Sc10 qui se compose d'un mode supplémentaire de traitement des flux d'énergie. S'agissant d'une unité d'upgrading qui est couteuse à l'achat et à l'entretien et aussi plus émettrice d'émissions de GES, Sc10 vient se classer en troisième position. Enfin, Sc11 est un scénario mixte combinant la centrale thermique moteur et l'unité d'upgrading, les coûts et les paramètres environnementaux sont alors encore un peu plus impactés.

Dans les classements suivants, nous avons en cinquième et sixième position respectivement Sc6 et Sc7. Ces scénarios proposent une valorisation énergétique par la production de biocarburant ou de gaz naturel. De prime à bord, une valorisation énergétique face à une valorisation autre de type biocarburant est économiquement plus coûteuse et sensiblement plus génératrice d'émissions de GES. Cependant, la rentabilité économique de ces installations par la vente du biocarburant ou du gaz naturel est plus élevée puisque vendue plus chère. Par conséquent Sc6 et Sc7 se positionnent devant Sc4 et Sc5.

En dernière position, nous retrouvons nos scénarios de base à savoir Sc1, Sc2 et Sc3 respectivement le tout à l'incinérateur, le tout à l'enfouissement et le scénario mixte combinant à la fois l'incinération et l'enfouissement. L'incinération est à l'investissement plus cher que l'enfouissement cependant elle présente une meilleure rentabilité sur l'énergie produite. En effet, la puissance installée pour l'incinérateur est 12 fois supérieure à celle de l'ISD respectivement 25 MW et 2 MW.

Concernant les scénarios Sc12 et Sc13, Ils présentent les avantages de Sc11 par une double valorisation mais les désavantages de l'incinération et de l'enfouissement venant ainsi s'intercaler entre Sc4/Sc5 et Sc1.

Nous pouvons dire, suite à ces observations, que nous nous sommes plutôt satisfait des classements déterminés par PROMETHEE au regard des références environnementales et contraintes qui nous ont guidé tout au long de nos recherches. Si nous devons affiner ce classement pour les rangs dits « conflictuels » à savoir de 7 à 11, nous procéderons comme suit :

- 7) Sc4
- 8) Sc5
- 9) Sc13
- 10) Sc12
- 11) Sc1

L'analyse des scénarios a permis de mettre en exergue certains points importants à savoir que lorsque l'on considère une gestion que nous avons appelée "raisonnée des déchets", il est tout d'abord possible :

- D'allier tous les facteurs et piliers du développement durable,
- Que le facteur économique ne soit pas un facteur limitant au regard du traitement physico-chimique,
- Que les émissions de GES produites par certains types de procédés comme l'incinération peuvent en partie être contrebalancées par une production effective d'énergie.

IV. Conclusion

Tout au long de ce chapitre, nous nous sommes attachés à présenter notre réflexion et analyser notre méthode d'élaboration des scénarios de gestion raisonnée des déchets. Ce terme de « gestion raisonnée » est important puisqu'il intègre la notion de maîtrise et de contrôle dans notre cas à la fois des paramètres économiques, sociaux et environnementaux.

C'est notamment par une recherche poussée des modes de traitements existants ou du moins expérimentés que nous avons pu dans cette thèse, au fil du temps nous forger une opinion sur les actions menées à l'échelle des gouvernements et des actions à développées notamment en milieu insulaire.

Partant de ce constat, il semble opportun de resituer les mesures liées à la gestion des déchets préconisées dans le cadre du PPGDND régional présenté au sein du chapitre introductif. La Figure 148 expose le scénario retenu pour traiter des déchets résiduels ou ce que nous avons appelés refus de traitement. En entrée du système, nous observons les DMA qui subissent un tri mécanique afin d'extraire la

partie organique du reste des déchets. Les biodéchets ainsi séparés représentent dans notre exemple une valeur de 30 000 t sur un total de 100 000 t de DMA soit 30%. Ils sont alors valorisés par compostage et/ou méthanisation avec principalement une valorisation matière ou en cas de dysfonctionnement une voie de secours par enfouissement après stabilisation. Le scénario Sc3 est le plus proche du scénario de gestion préconisé au niveau du PPGDND, combinant à la fois l'incinération et l'enfouissement. Les autres refus à haut PCi sont acheminés vers une unité d'incinération où les extrants subiront une maturation avant enfouissement. Ce scénario est très bien construit et prend en considération le fait qu'à chaque étape de gestion, des produits induits sont engendrés nécessitant à leur tour un traitement approprié.

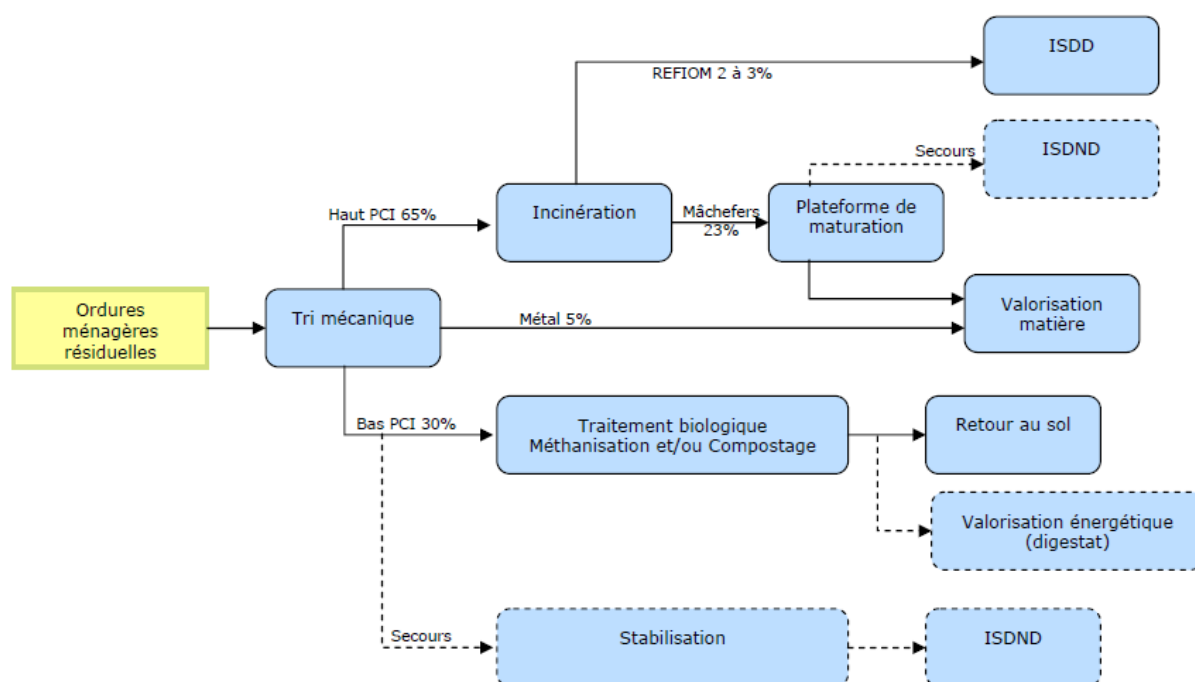


Figure 148 : Scénarios issus du PPDGDND pour le traitement des déchets résiduels des ordures ménagères

Si l'on compare le scénario du PPDGDND au scénario Sc3, nous nous apercevons qu'ils sont proches. Or au vu de nos analyses suite au classement des scénarios retenus au cours de l'étude, Sc3 n'est pas classé favorablement. Cela est notamment dû à l'utilisation de l'incinérateur qui bien que producteur d'énergie est un mode de traitement cher et générateur d'émissions de GES. A partir de ce constat, il apparaît important d'élargir notre réflexion en prenant en compte d'autres technologies avancées de traitement et d'élargir notre champ de réflexion et d'analyse pour mieux répondre aux problématiques posées dans notre île. Il serait donc intéressant de réajuster la tendance en proposant d'autres combinaisons de procédés.

La gestion des déchets à la Réunion est cantonnée à se calquer sur les scénarios nationaux voir continentaux alors que de simples modifications sur les orientations et les objectifs de base peuvent changer la situation. Au final, une gestion raisonnée des déchets sur le territoire pourrait s'articuler autour de 5 types de scénarios dont les objectifs de traitement seraient à considérer selon la zone de traitement. Par

exemple, les objectifs de traitement pour une commune agricole comme le Tampon pourraient être la promotion de la valorisation matière au vu des surfaces d'épandage existantes associées à une valorisation énergétique au sein de bâtiments d'élevage de proximité.

Conclusion générale et perspectives

"We do this not because it's fashionable, but because it makes sense. It improves public health, it beautifies the city, it enhances the quality of life, it saves money, and it leaves a legacy for future generations."

Mayor Richard Daley

Au cours de mes recherches dans le cadre de ma thèse, j'ai pris véritablement conscience de la multitude et de la complexité des problèmes qui sont posés autour de la gestion des déchets. Une bonne gestion des déchets nécessite une connaissance de paramètres technologiques, mais aussi environnementaux, et économiques interférant avec des contraintes sociologiques et politiques. Les entités observées sont éminemment complexes. Nous devons donc nous référer à l'ensemble des préceptes et concepts de l'approche systémique pour nous guider au cours de nos descriptions et analyses. Il serait peu judicieux de se positionner dans un champ restreint d'observation qu'il soit technologique, économique ou environnemental. Nous devons tout mettre en relation avec tout en prenant soin de nous positionner à un niveau de description adéquat. Toute focalisation sur une échelle de description non appropriée peut conduire à des analyses erronées.

Chaque système d'observation est unique dans son contexte, qu'il soit spatial, géographique ou encore politique. Plusieurs facettes sont à prendre en compte toujours dans le but de tout optimiser. Cette optimisation passe notamment par la considération des besoins en valorisation, qu'elle soit par exemple énergétique, organique ou autre autour d'une filière raisonnée des déchets en territoire insulaire pour ce qui nous concerne dans cette thèse.

La première partie de ma thèse autour des chapitres 0, 1, 2 et 3 avaient pour objectif de bien cerner l'état de l'art concernant la gestion et le traitement des déchets, de bien situer les problématiques rencontrées à La Réunion à ce sujet et d'explorer les outils mathématiques intéressants pour conduire nos recherches. Avant d'aborder concrètement les problématiques que nous voulions traiter dans le cadre de cette thèse, il nous est apparu nécessaire de mettre en œuvre un outil de simulation des filières de gestion et de traitement des déchets s'appuyant sur l'analyse systémique et le cadre normatif des normes ISO 14014 autour des descriptions et des analyses environnementales.

L'exploration, un premier temps des **méthodes d'analyses** existantes, nous a permis d'élargir le champ des possibles pour une adaptation et une appropriation à des études de cas. L'application de l'ACP a notamment permis l'isolation de cinq typologies de communes dans leur composition, tant qualitative que quantitative des biodéchets. Ces typologies étant directement liées aux caractères, plutôt urbain ou au contraire rural des communes et par conséquent à leur mode économique. Cette analyse a donné lieu à une publication en cours de validation.

D'autres analyses pourraient être poursuivies afin de proposer un panel régional de ratios de production pour l'ensemble des flux qu'ils soient organiques ou non. Les expérimentations conduites dans ce but viendraient alimenter les bases de données établies en vue d'affiner les connaissances déjà existantes.

Comme nous avons pu le voir, les données sur les biodéchets sont très approximatives du fait qu'ils ne soient pas collectés séparément des autres déchets. Ce point me semble essentiel à développer et à améliorer sur le territoire afin d'optimiser les scénarios préconisés.

Par ailleurs, l'analyse des sites potentiels montre qu'il existe des terrains viables pour la mise en place d'unités de traitement. Mais le point essentiel à retenir est

que sur un territoire insulaire, les possibilités sont restreintes et non extensibles. Prévoir des scénarios avec implantations de plusieurs d'incinérateurs et les installations stockage des déchets spécifiques à ce type d'activité semble inappropriés. En effet, ce type d'installations étant conçu pour les espaces continentaux, il est difficilement envisageable de les adapter aux territoires insulaires dans le cas d'une gestion locale et raisonnée des déchets.

De ce fait, il est préférable d'utiliser notre position en tant que terre expérimentale dans une optique d'innovation et de performances afin de nous ouvrir au monde ou d'attirer le monde à nous par nos actions. La Réunion fut et est encore à l'origine de nombreuses découvertes notamment dans l'industrie sucrière. Pourquoi ne pas développer cette intuition et ses capacités dans le domaine de la gestion des biodéchets à l'image de la station du Grand Prado.

L'analyse des d'outils de simulation dans un deuxième temps a permis la mise en lumière des cadres normatifs existants permettant ainsi la structuration de l'outil de simulation. Nous avons pu développer autour conception de cet outil, une méthode d'analyse des systèmes globaux d'observation. Cette méthode bien que « subjective » car élaborée au travers de la vision de l'observateur n'en est pas moins originale et pertinente. C'est à force de questionnements et de remises en question que nous avons pu aujourd'hui proposer un tel outil. Il nous a permis d'affiner aux plus près les connaissances nécessaires pour performer des filières de traitement et de gestion des déchets.

En effet, cet outil permet d'intégrer des possibilités infinies de variations de paramètres de fonctionnement et d'observer toutes leurs incidences à différents niveaux d'observation via son interface de sorties graphiques. De cette interface, il est alors possible d'identifier les éventuels problèmes au cœur même du process (composants) et ces effets sur l'ensemble de la filière selon une approche systémique.

Une acquisition de données autour des critères d'évaluation des scénarios retenus a été notamment effectuée. Au regard des objectifs de recherches, il serait intéressant de mener d'autres développements de l'outil de simulation en le couplant à d'autres bases de données comme celles de GEMIS ou BEES afin de mieux prendre en compte toute la phase d'aménagement et de construction des filières.

D'autres perspectives sont à prévoir comme la création d'un outil global d'évaluation des scénarios par la définition des indicateurs autour de stratégies liés à des objectifs de traitement et d'axes d'action.

Dans la deuxième partie de cette thèse, essentiellement applicative, nous nous sommes donc intéressés à une multitude de problématiques rencontrés à La Réunion concernant d'abord les gisements de déchets et leur principales caractéristiques, puis les sites potentiels de gestion et traitement des déchets et enfin les scénarios possible de gestion et de traitement des déchets. Pour conduire notre réflexion nous avons été amenés, à définir des champs d'études précis autour desquels, il nous ait apparu judicieux de cerner des cadres méthodologiques adaptés.

L'ACP, s'est révélée être un outil performant pour mener des analyses pointues sur les typologies de déchets en relation avec les sources et lieux de production des déchets à La Réunion. Ces analyses présentent un intérêt certain pour mieux comprendre les caractéristiques des gisements de déchets à La Réunion. Elles pourraient être développées autour d'autres angles d'observation et d'autres indicateurs de caractérisation. La démarche mise en œuvre et l'outil sur lequel nous nous sommes appuyés ne nous limite pas quant aux paramètres d'observation.

L'analyse multicritères développée autour de l'outil de calcul PROMETHEE, s'est également révélée être une démarche pertinente pour classer des alternatives de solution à proposer autour de la gestion et du traitement des déchets.

Son application au classement des sites favorables à l'installation d'unités de traitement des déchets nous permet de cerner des informations précieuses dans les processus de décision à mettre en place. Le croisement entre les caractéristiques des gisements, et les principales caractéristiques des sites a pu ainsi être mené avec rigueur et pertinence.

De même son application au classement des meilleurs scénarios de gestion et de traitement des déchets nous permet de conduire une réflexion la moins orientée possible afin d'assurer une bonne crédibilité des choix et décisions à retenir.

Dans les deux cas, notre approche méthodologique nous permet d'ouvrir le champ de notre réflexion dans beaucoup de direction autour notamment de la définition des critères et de leur évaluation, et aussi du choix des alternatives possibles (sites potentiels et de modes ou de technologie de traitement des déchets et typologie des déchets). Les problématiques peuvent être très vastes en relation avec les opportunités technologiques, les données environnementales et les contraintes économiques, sociologiques ou politiques. Nous avons abordé ces questions, sans prétendre à une très grande pertinence dans la définition des problèmes qui reste très ouvert comme nous l'avons souligné. Cette dernière application fait appel aux données et résultats de l'outil de simulation des filières de traitement mis en œuvre dans le chapitre 3. Les évaluations de critères dans le choix des scénarios concernent des systèmes complexes qu'il est important de décrire de manière systémique autour de paramètres de fonctionnements précis en relation avec des caractéristiques structurelles adéquats. Au-delà des données numériques que nous sommes amenées à retenir, nous devons nous positionner dans une logique de description la plus pertinente possible.

Les applications et exemples traités sont certes importants, mais il convient avant tout de souligner la contribution de notre étude quant à l'élaboration d'une démarche crédible afin de cerner les réponses aux multitudes de questions qui se posent autour de la gestion et du traitement des déchets.

Faisons notre part et suivons le Colibri

Bibliographie

Achillas CH., Vlachokostas C., Moussiopoulos N., Banias G., (2010), Decision support system for the optimal location of electrical and electronic waste treatment plants: A case study in Greece, *Waste Management*, 30, 870-879.

ADEME, 2005. Boeglin, N. & Veuillet, D. Introduction à l'Analyse de cycle de vie (ACV). Département Eco-Conception & Consommation Durable.

ADEME, 2014. Chiffres-clés, Edition 2014.

ADEME, 2008. Elaboration d'un plan ou programme de prévention des déchets http://multimedia.ademe.fr/outils/Programme_Prevention_Dechets/contenu/pages/1.1.intro.html.

ADEME, 2013. Estimation des gisements potentiels de substrats utilisables en méthanisation, Bastide, G. ; Service Prévention et Gestion des Déchets, Direction Consommation Durable et Déchets – ademe angers, 117p.

ADEME, 2010. Etude estimative de la production de bio-dechets au sein des établissements de restauration, Groupement National de la Restauration, 61p.

ADEME, 2011. Etude Diagnostic Déchets Organiques. Syctom de l'agglomération parisienne Agence Métropolitaine des Déchets Ménagers, 120p.

Agrest, 2010. Recensement Agricole 2010. Chiffres détaillés par communes pour les élevages. <http://agreste.agriculture.gouv.fr/>

Ahmed, I.I., Gupta, A.K., 2010. Pyrolysis and gasification of food waste: Syngas characteristics and char gasification kinetics. *Applied Energy* 87, 101-108

Al-Khatib, I.A., Monou, M., Abu Zahra, A.S.F., Shaheen, H.Q., Kassinos, D., 2010. Solid waste characterization, quantification and management practices in developing countries. A case study: Nablus district – Palestine. *J. Environ. Manage.* 91, 1131-1138.

Al-Rashdan, D., Al-Kloub, B., Dean, A., Al-Shemmeri, T., 1999. Environmental impact assessment and ranking the environmental projects in Jordan. *European Journal of Operational Research* 118, 30-45.

Al-Rashdan, D., Al-Kloub, B., Dean, A., Al-Shemmeri, T., 1999. Environmental impact assessment and ranking the environmental projects in Jordan. *European Journal of Operational Research* 118, 30-45.

Alvarez-Guerra, M.; et al. 2009. A multicriteria-based methodology for site prioritisation in sediment management. *Environ.Int.Appl.* 35, 920-930.

Antonini, G.; 2010. Les procédés de valorisation énergétique par pyrolyse et gazéification. Congrès Européen Eco-Technologies pour le futur, Lille.

ARER, 2014. Bilan Energique de la Réunion. Agence régionale de l'énergie Réunion, Observatoire de l'Energie Réunion.

Arena, U., 2012. Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review. *Waste Manage.* 32, 625-639.

Arena, U., Di Gregorio, F., 2014. A waste management planning based on substance flow analysis. *Resources, Conservation and Recycling* 85, 54-66.

Arvanitoyannis, I.S., Varzakas, T.H., 2008. 9 - Fruit/Fruit Juice Waste Management: Treatment Methods and Potential Uses of Treated Waste, in: Ioannis, S.A., Dr., Ph.D.A2 -

Ioannis S. Arvanitoyannis, Dr Ph D. (Ed.), Waste Management for the Food Industries. Academic Press, Amsterdam, pp. 569-628.

Arvanitoyannis, I.S., Ladas, D., 2008. 12 - Meat Waste Management: Treatment Methods and Potential Uses of Treated Waste, in: Ioannis, S.A., Dr., Ph.D.A2 - Ioannis S. Arvanitoyannis, Dr Ph D. (Ed.), Waste Management for the Food Industries. Academic Press, Amsterdam, pp. 765-800.

Baccini, A.; 2010. Statistique Descriptive Multidimensionnelle (pour les nuls). Institut de Mathématiques de Toulouse, UMR CNRS 5219.

Bağcı, B., 2009. Towards a Zero Energy Island. Renewable Energy 34, 784-789.

Bahadori, A., Vuthaluru, H.B., 2010. Estimation of performance of steam turbines using a simple predictive tool. Applied Thermal Engineering 30, 1832-1838.

Bai, R., Sutanto, M., 2002. The practice and challenges of solid waste management in Singapore. Waste Manage. 22, 557-567.

Banar, M., Cokaygil, Z., Ozkan, A., 2009. Life cycle assessment of solid waste management options for Eskisehir, Turkey. Waste Manage. 29, 54-62.

Banias, G., Achillas, C., Vlachokostas, C., Moussiopoulos, N., Tarsenis, S., 2010. Assessing multiple criteria for the optimal location of a construction and demolition waste management facility. Build. Environ. 45, 2317-2326

Banks, C.J., Chesshire, M., Heaven, S., Arnold, R., 2011. Anaerobic digestion of source-segregated domestic food waste: Performance assessment by mass and energy balance. Bioresour. Technol. 102, 612-620.

Baptista, M., Antunes, F., Gonçalves, M.S., Morvan, B., Silveira, A., 2010. Composting kinetics in full-scale mechanical-biological treatment plants. Waste Manage. 30, 1908-1921.

Barret, M., Barcia, G.C., Guillon, A., Carrère, H., Patureau, D., 2010. Influence of feed characteristics on the removal of micropollutants during the anaerobic digestion of contaminated sludge. J. Hazard. Mater. 181, 241-247.

Behera, S.K., Park, J.M., Kim, K.H., Park, H.-S., 2010. Methane production from food waste leachate in laboratory-scale simulated landfill. Waste Manage. 30, 1502-1508.

Behzadian, M., Kazemzadeh, R.B., Albadvi, A., Aghdasi, M., 2010. PROMETHEE: A comprehensive literature review on methodologies and applications. European Journal of Operational Research 200, 198-215.

Beigl, P., Lebersorger, S., Salhofer, S., 2008. Modelling municipal solid waste generation: A review. Waste Manage. 28, 200-214.

Ben Mena, S. ; 2000. Introduction aux méthodes multicritères d'aide à la décision. Biotechnol. Agron. Soc. Environ. 2000 4 (2), 83-93.

Benzécri, J.P., (1973) « La place de l'a priori » Encyclopédia Universalis, Vol 17, Organum pp. 11-24.

Besse, P.; 2014. WikiStat, Statistique exploratoire multidimensionnelle. Institut Mathématique de Toulouse.

Beretta, C., Stoessel, F., Baier, U., Hellweg, S., 2013. Quantifying food losses and the potential for reduction in Switzerland. Waste Manage. 33, 764-773.

Berglund, M., Börjesson, P., 2006. Assessment of energy performance in the life-cycle of biogas production. Biomass Bioenergy 30, 254-266.

- Bernai, M.P., Paredes, C., Sánchez-Monedero, M.A., Cegarra, J., 1998. Maturity and stability parameters of composts prepared with a wide range of organic wastes. *Bioresour. Technol.* 63, 91-99.
- Bernstad, A., 2014. Household food waste separation behavior and the importance of convenience. *Waste Manage.* 34, 1317-1323.
- Berger, C., Savard, G., Wizere, A., 1999. EUGENE: an optimization model for integrated regional solid waste management planning. *Int. J. Environment and Pollution* 12 (2/3), 280-307.
- Bhuiyan, S.H., 2010. A crisis in governance: Urban solid waste management in Bangladesh. *Habitat International* 34, 125-133.
- Binder, C.R., 2007. From material flow analysis to material flow management Part I: social sciences modeling approaches coupled to MFA. *Journal of Cleaner Production* 15, 1596-1604.
- Binder, C.R., 2007. From material flow analysis to material flow management Part II: the role of structural agent analysis. *Journal of Cleaner Production* 15, 1605-1617.
- Binder, C.R., Hofer, C., Wiek, A., Scholz, R.W., 2004. Transition towards improved regional wood flows by integrating material flux analysis and agent analysis: the case of Appenzell Ausserrhoden, Switzerland. *Ecol. Econ.* 49, 1-17.
- Björklund, A. and Bjuggren, C. 1998. Waste Modelling Using Substance Flow Analysis and Life Cycle Assessment. Paper 98-A431 in proceedings of the Air & Waste Management Association's Annual Meeting, June 14-18, 1998, San Diego, CA, USA.
- Björklund, A., Dalemo, M., and Sonesson, U. 1999. Evaluating a Municipal Waste Management Plan Using ORWARE. *Journal of Cleaner Production*, 7(4), 271-280.
- Boer, E.d., Jędrzak, A., Kowalski, Z., Kulczycka, J., Szpadt, R., 2010. A review of municipal solid waste composition and quantities in Poland. *Waste Manage.* 30, 369-377.
- Boesch, M.E., Vadenbo, C., Saner, D., Huter, C., Hellweg, S., 2014. An LCA model for waste incineration enhanced with new technologies for metal recovery and application to the case of Switzerland. *Waste Manage.* 34, 378-389.
- Bouallagui, H., Touhami, Y., Ben Cheikh, R., Hamdi, M., 2005. Bioreactor performance in anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes. *Process Biochem.* 40, 989-995.
- Bouhana, A., Fekih, A., Abed, M., Chabchoub, H., 2013. An integrated case-based reasoning approach for personalized itinerary search in multimodal transportation systems. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 31, 30-50.
- Bovea, M.D., Ibáñez-Forés, V., Gallardo, A., Colomer-Mendoza, F.J., 2010. Environmental assessment of alternative municipal solid waste management strategies. A Spanish case study. *Waste Manage.* 30, 2383-2395.
- Brans, J.P., Macharis, C., Kunsch, P.L., Chevalier, A., Schwaninger, M., 1998. Combining multicriteria decision aid and system dynamics for the control of socio-economic processes. An iterative real-time procedure. *European Journal of Operational Research* 109, 428-441.
- Brans, J.-P., Mareschal, B., 1994. The PROMCALC & GAIA decision support system for multicriteria decision aid. *Decision Support Systems* 12, 297-310.
- Briggs, T., Kunsch, P.L., Mareschal, B., 1990. Nuclear waste management: An application of the multicriteria PROMETHEE methods. *European Journal of Operational Research* 44, 1-10

- Brizmohun, R., Ramjeawon, T., Azapagic, A., 2015. Life cycle assessment of electricity generation in Mauritius. *Journal of Cleaner Production* 106, 565-575.
- Bruhn, A., Dahl, J., Nielsen, H.B., Nikolaisen, L., Rasmussen, M.B., Markager, S., Olesen, B., Arias, C., Jensen, P.D., 2011. Bioenergy potential of *Ulva lactuca*: Biomass yield, methane production and combustion. *Bioresour. Technol.* 102, 2595-2604.
- Bueno, G., Latasa, I., Lozano, P.J., 2015. Comparative LCA of two approaches with different emphasis on energy or material recovery for a municipal solid waste management system in Gipuzkoa. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 51, 449-459.
- Bouyssou, D. ; Stewart, T. , 2002. Multiple criteria Decision Analysis : An Integrated Approach, Kluwer Academic, Dordrecht.
- Byun, Y., Cho, M., Chung, J.W., Namkung, W., Lee, H.D., Jang, S.D., Kim, Y.-S., Lee, J.-H., Lee, C.-R., Hwang, S.-M., 2011. Hydrogen recovery from the thermal plasma gasification of solid waste. *J. Hazard. Mater.* 190, 317-323.
- C.A, B., 2000. Solid waste management in New Zealand. *Waste Manage.* 20, 517-526.
- Cadena, E., Colón, J., Sánchez, A., Font, X., Artola, A., 2009. A methodology to determine gaseous emissions in a composting plant. *Waste Manage.* 29, 2799-2807.
- Cano-Orellana, A., Delgado-Cabeza, M., 2015. Local ecological footprint using Principal Component Analysis: A case study of localities in Andalusia (Spain). *Ecol. Indicators* 57, 573-579.
- Carlsson, M., Lagerkvist, A., Morgan-Sagastume, F., 2012. The effects of substrate pre-treatment on anaerobic digestion systems: A review. *Waste Manage.* 32, 1634-1650.
- Castro-Schez, J.J., Miguel, R., Herrera, V., Albusac, J.A., 2013. Supporting multi-criteria decisions based on a hierarchical structure by taking advantage of acquired knowledge. *Applied Soft Computing* 13, 509-526.
- Cecchi, F., Bolzonella, D., Pavan, P., Macé, S., Mata-Alvarez, J., 2011. Anaerobic Digestion of the Organic Fraction of Municipal Solid Waste for Methane Production: Research and Industrial Application, in: Editor-in-Chief: Murray, M.-Y. (Ed.), *Comprehensive Biotechnology* (Second Edition). Academic Press, Burlington, pp. 463-472.
- Chaibakhsh, A., Ghaffari, A., 2008. Steam turbine model. *Simulation Modelling Practice and Theory* 16, 1145-1162.
- Chakhar, S. ; Mousseau, V.; 2007. Spatial Multicriteria Decision Making. In Shashi Shekhar and Hui Xiong, editors, *Encyclopedia of Geographical Information Science*. Springer, 2007.
- Chakrabarti, S., Majumder, A., Chakrabarti, S., 2009. Public-community participation in household waste management in India: An operational approach. *Habitat International* 33, 125-130.
- Chamy, R., Ramos, C., 2011. Factors in the determination of methanogenic potential of manure. *Bioresour. Technol.* 102, 7673-7677.
- Chang, S., Li, J.-Z., Liu, F., 2011. Evaluation of different pretreatment methods for preparing hydrogen-producing seed inocula from waste activated sludge. *Renewable Energy* 36, 1517-1522.
- Chattopadhyay, S., Dutta, A., Ray, S., 2009. Municipal solid waste management in Kolkata, India – A review. *Waste Manage.* 29, 1449-1458.

- Chen, F., Duic, N., Manuel Alves, L., da Graça Carvalho, M., 2007. Renewislands—Renewable energy solutions for islands. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11, 1888-1902.
- Chen, T.-Y., 2011. A multimeasure approach to optimism and pessimism in multiple criteria decision analysis based on Atanassov fuzzy sets. *Expert Systems with Applications* 38, 12569-12584.
- Chen, X., Xi, F., Geng, Y., Fujita, T., 2011. The potential environmental gains from recycling waste plastics: Simulation of transferring recycling and recovery technologies to Shenyang, China. *Waste Manage.* 31, 168-179.
- Chen, D.; et Chrisensen, T.H.; 2010. Life-cycle assesement (EASEWASTE) of two municipal solid waste incineration technologies in China “Waste Management and Research 28 (6) p.508-519.
- Cherubini, F., Bargigli, S., Ulgiati, S., 2009. Life cycle assessment (LCA) of waste management strategies: Landfilling, sorting plant and incineration. *Energy* 34, 2116-2123.
- Cho, H.S., Moon, H.S., Kim, J.Y., 2012. Effect of quantity and composition of waste on the prediction of annual methane potential from landfills. *Bioresour. Technol.* 109, 86-92.
- Chynoweth, D.P., Owens, J.M., Legrand, R., 2001. Renewable methane from anaerobic digestion of biomass. *Renewable Energy* 22, 1-8.
- Chynoweth, D.P., Turick, C.E., Owens, J.M., Jerger, D.E., Peck, M.W., 1993. Biochemical methane potential of biomass and waste feedstocks. *Biomass Bioenergy* 5, 95-111.
- CIBOIS, P. ; 2006. Que sais-je ? « L'analyse factorielle » - N°2095, ed. PUF.
- Clark Ii, W.W., Cooke, G., 2014. Chapter 2 - The Green Industrial Revolution, in: Clark, W.W. (Ed.), *Global Sustainable Communities Handbook*. Butterworth-Heinemann, Boston, pp. 13-39.
- Cleary, J., 2009. Life cycle assessments of municipal solid waste management systems: A comparative analysis of selected peer-reviewed literature. *Environ. Int.* 35, 1256-1266.
- Clift, R., Doig, A., Finnveden, G., 2000. The application of life cycle assessment to integrated solid waste management. *Trans IChemE* 78 (B), 279–287.
- Consonni, S., Giugliano, M., Massarutto, A., Ragazzi, M., Saccani, C., 2011. Material and energy recovery in integrated waste management systems: Project overview and main results. *Waste Manage.* 31, 2057-2065.
- Coronado, M., Dosal, E., Coz, A., Viguri, J.R., Andrés, A., (2011), Estimation of construction and demolition waste (C&DW) generation and multicriteria analysis of C&DW management alternatives: A case study in Spain, *Waste and Biomass Valorization*, 2, 209-225.
- Couth, R., Trois, C., 2011. Waste management activities and carbon emissions in Africa. *Waste Manage.* 31, 131-137.
- Crosbie, T., Dawood, N., Dawood, S., 2011. Improving the energy performance of the built environment: The potential of virtual collaborative life cycle tools. *Automation in Construction* 20, 205-216.
- Curry, N., Pillay, P., 2012. Biogas prediction and design of a food waste to energy system for the urban environment. *Renewable Energy* 41, 200-209.
- Davidsson, Å., Gruvberger, C., Christensen, T.H., Hansen, T.L., Jansen, J.I.C., 2007. Methane yield in source-sorted organic fraction of municipal solid waste. *Waste Manage.* 27, 406-414.

- D'Avignon, G., Mareschal, B., 1989. Specialization of hospital services in Quebec: An application of the promethee and GAIA methods. *Mathematical and Computer Modelling* 12, 1393-1400.
- De Guardia, A., Mallard, P., Teglia, C., Marin, A., Le Pape, C., Launay, M., Benoist, J.C., Petiot, C., 2010. Comparison of five organic wastes regarding their behaviour during composting: Part 1, biodegradability, stabilization kinetics and temperature rise. *Waste Manage.* 30, 402-414.
- Deepchand, K., 2002. Promoting equity in large-scale renewable energy development: the case of Mauritius. *Energy Policy* 30, 1129-1142.
- Demirel, B., Scherer, P., 2011. Trace element requirements of agricultural biogas digesters during biological conversion of renewable biomass to methane. *Biomass Bioenergy* 35, 992-998.
- De Silguy, C., 1996, *Histoire des hommes et de leurs ordures : du Moyen-âge à nos jours*, Le Cherche Midi, Paris.
- Dézier, M. ; 2001. Le Procédé Calcior : <http://www.gestra71.com/procede-calcior-traitement-des-dechets>.
- Dong, L., Zhenhong, Y., Yongming, S., Longlong, M., 2010. Evaluation of pretreatment methods on harvesting hydrogen producing seeds from anaerobic digested organic fraction of municipal solid waste (OFMSW). *International Journal of Hydrogen Energy* 35, 8234-8240.
- Dosal, E.; 2012. Application of multi-criteria decision-making tool to locate construction and demolition waste (C&DW) recycling facilities in a northern Spanish region. *Environmental Engineering and management Journal*. 11 (3), 545-556.
- Duby, C.; Robin, S. ; 2006. *Analyse en Composantes Principales*. Département OMIP. Institut National Agronomique Paris.
- EC Directive, (2008), Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on Waste, European Commission.
- El Hanandeh, A., El-Zein, A., 2010. The development and application of multi-criteria decision-making tool with consideration of uncertainty: The selection of a management strategy for the bio-degradable fraction in the municipal solid waste. *Bioresour. Technol.* 101, 555-561.
- Elahee, M.K., 2011. Sustainable energy policy for small-island developing state: Mauritius. *Utilities Policy* 19, 71-79.
- Elbeshbishy, E., Hafez, H., Dhar, B.R., Nakhla, G., 2011. Single and combined effect of various pretreatment methods for biohydrogen production from food waste. *International Journal of Hydrogen Energy* 36, 11379-11387.
- El Houcine, A.; 2009. *Etude de valorization énergétique de la biomasse locale par gazéification*. Université M'Hamed Bouraga Boumerdès 52.p.
- Emery, A., Davies, A., Griffiths, A., Williams, K., 2007. Environmental and economic modelling: A case study of municipal solid waste management scenarios in Wales. *Resources, Conservation and Recycling* 49, 244-263.chap2
- EPIC and CSR, 2000. *Integrated Solid Waste Management Tools: Measuring the Environmental Performance of Waste Management Systems*. Environment and Plastics Industry Council and Corporations supporting recycling.

- ERRA, 1999. The Case for Integrated Waste Management, a briefing paper. European Recovery and Recycling Association.
- Eriksson, O., Bisaillon, M., 2011. Multiple system modelling of waste management. *Waste Manage.* 31, 2620-2630.
- Eriksson, O., Bisaillon, M., Haraldsson, M., Sundberg, J., 2014. Integrated waste management as a mean to promote renewable energy. *Renewable Energy* 61, 38-42.
- Eriksson, O., Finnveden, G., Ekvall, T., Björklund, A., 2007. Life cycle assessment of fuels for district heating: A comparison of waste incineration, biomass- and natural gas combustion. *Energy Policy* 35, 1346-1362.
- Eriksson, O., Frostell, B., Björklund, A., Assefa, G., Sundqvist, J.O., Granath, J., Carlsson, M., Baky, A., Thyselius, L., 2002. ORWARE—a simulation tool for waste management. *Resources, Conservation and Recycling* 36, 287-307.
- Escamilla-Alvarado, C., Ríos-Leal, E., Ponce-Noyola, M.T., Poggi-Varaldo, H.M., Gas biofuels from solid substrate hydrogenogenic-methanogenic fermentation of the organic fraction of municipal solid waste. *Process Biochem.*
- Eurostat, (2012), Statistics database. Waste statistics, On line at: <http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/setupModifyTableLayout.do>.
- Facchin, V., Cavinato, C., Fatone, F., Pavan, P., Cecchi, F., Bolzonella, D., Effect of trace element supplementation on the mesophilic anaerobic digestion of foodwaste in batch trials: the influence of inoculum origin. *Biochem. Eng. J.*
- Fagnano, M., Adamo, P., Zampella, M., Fiorentino, N., 2011. Environmental and agronomic impact of fertilization with composted organic fraction from municipal solid waste: A case study in the region of Naples, Italy. *Agric., Ecosyst. Environ.* 141, 100-107.
- Fdez.-Güelfo, L.A., Álvarez-Gallego, C., Sales Márquez, D., Romero García, L.I., 2011. Biological pretreatment applied to industrial organic fraction of municipal solid wastes (OFMSW): Effect on anaerobic digestion. *Chem. Eng. J.* 172, 321-325.
- Figuerira J., Greco S., Ehrgott M., (2005), Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys, In: *International Series in Operations Research & Management Science*, Greco S. (Ed.), vol. 78.
- Finnveden, G.; Ekvall, T.; 1998. Life-cycle assessment as a decision support too: The case of recycling versus incineration of paper? *Conservation and Recycling* 24 (3-4) p.235-256.
- Fliedner, A.;1999. Organic Waste Treatment in Biocells. A Computer-based Modelling Approach in the Context of Environmental Systems Analysis. Master Thesis, TRITA-KET-IM 1999:5, Department of Chemical Engineering and Technology, Division of Industrial Ecology, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- FNADE, 2010.
- Fülöp, J.; 2010. Introductionto decision making methods. Laboratory of research and decision systems, computer and automation institute, Hungarian Academy of sciences. Evergreen College weg: <http://academic.evergreen.edu/projets/bdei/documents/decisionmakingmethods.pdf>
- Gac, A., Béline, F., Bioteau, T., Maguet, K., 2007. A French inventory of gaseous emissions (CH₄, N₂O, NH₃) from livestock manure management using a mass-flow approach. *Livestock Science* 112, 252-260.
- Garrone, P., Melacini, M., Perego, A., 2014. Opening the black box of food waste reduction. *Food Policy* 46, 129-139.

- Gervásio, H., Simões da Silva, L., 2012. A probabilistic decision-making approach for the sustainable assessment of infrastructures. *Expert Systems with Applications* 39, 7121-7131.
- Giraud et Pamart, (1974), *Les mots dans le vent* : Larousse, 25.p.
- Gómez-Barea, A., Vilches, L.F., Leiva, C., Campoy, M., Fernández-Pereira, C., 2009. Plant optimisation and ash recycling in fluidised bed waste gasification. *Chem. Eng. J.* 146, 227-236.
- Guan, Y., Luo, S., Liu, S., Xiao, B., Cai, L., 2009. Steam catalytic gasification of municipal solid waste for producing tar-free fuel gas. *International Journal of Hydrogen Energy* 34, 9341-9346.
- Gupta, S., Mohan, K., Prasad, R., Gupta, S., Kansal, A., 1998. Solid waste management in India: options and opportunities. *Resources, Conservation and Recycling* 24, 137-154.
- Haastrup, P., Maniezzo, V., Mattarelli, M., Mazzeo Rinaldi, F., Mendes, I., Paruccini, M., 1998. A decision support system for urban waste management. *European Journal of Operational Research* 109, 330-341.
- Harrison, K.W., Dumas, R.D., Solano, E., Barlaz, M.A., Brill, E.D., Ranjithan, S.R., 2001. Decision support for life cycle based solid waste management. *Journal of Computing in Civil Engineering* January, 44-58.
- He, M., Hu, Z., Xiao, B., Li, J., Guo, X., Luo, S., Yang, F., Feng, Y., Yang, G., Liu, S., 2009. Hydrogen-rich gas from catalytic steam gasification of municipal solid waste (MSW): Influence of catalyst and temperature on yield and product composition. *International Journal of Hydrogen Energy* 34, 195-203.
- Hendriks, M.M.W.B., de Boer, J.H., Smilde, A.K., Doornbos, D.A., 1992. Multicriteria decision making. *Chemometrics Intellig. Lab. Syst.* 16, 175-191.
- Henry, R.K., Yongsheng, Z., Jun, D., 2006. Municipal solid waste management challenges in developing countries – Kenyan case study. *Waste Manage.* 26, 92-100.
- Hermann, B.G., Kroeze, C., Jawjit, W., 2007. Assessing environmental performance by combining life cycle assessment, multi-criteria analysis and environmental performance indicators. *Journal of Cleaner Production* 15, 1787-1796.
- Hokkanen, J., Salminen, P., 1997. Choosing a solid waste management system using multicriteria decision analysis. *European Journal of Operational Research* 98, 19-36. Chap1
- Hong, J.; Wang, G.; *et al.* 2006. Life-cycle assessment of BMT- based integrated municipal solid waste management. Case study in Pudong, China, *Ressources, Conservation and Recycling* 49 (2) p.129-146.
- Hoornweg, .; Bhada-Tata, P.;. 2012. *What a Waste: A Global Review of Solid Waste Management*. World Bank, Washington, DC. © World Bank.
- Huang, Y.-T., Pan, T.-C., Kao, J.-J., 2011. Performance assessment for municipal solid waste collection in Taiwan. *J. Environ. Manage.* 92, 1277-1283.
- Huguenin, J.-M., 2015. Data Envelopment Analysis and non-discretionary inputs: How to select the most suitable model using multi-criteria decision analysis. *Expert Systems with Applications* 42, 2570-2581.
- Hung, M.-L., Ma, H.-w., Yang, W.-F., 2007. A novel sustainable decision making model for municipal solid waste management. *Waste Manage.* 27, 209-219.
- INSEE, 2012. Flash Réunion n° 16 - Décembre 2014.
- INSEE , 2010. Revue « Economie de la Réunion » n° 137, décembre 2010.

- ISO 14040:1997, 1997. Environmental Management—Life Cycle Assessment—Principles and Framework (ISO 14040:1997). International Standards Organisation, Geneva.
- ISO 14041:1998, 1998. Environmental management—Life Cycle assessment—Goal and Scope Definition and inventory analysis (ISO: 14041). International Standards Organisation, Geneva.
- ISO 14042:2000, 2000. Environmental Management—Life Cycle assessment—Life Cycle Impact Assessment (ISO 14042:2000). International Standards Organisation, Geneva.
- ISO 14043:2000, 2000. Environmental Management—Life Cycle Assessment—Life Cycle Interpretation (ISO 14043:2000). International Standards Organisation, Geneva.
- Jäger-Waldau, A., Scholz, H., 2005. EU renewables: Energy end-use efficiency and electricity from biomass, wind and PV in the EU. *Refocus* 6, 58-60.
- Joseph, P., Tretsiakova-McNally, S., McKenna, S., 2012. Characterization of cellulosic wastes and gasification products from chicken farms. *Waste Manage.* 32, 701-709.
- Kahhat, R., Williams, E., 2012. Materials flow analysis of e-waste: Domestic flows and exports of used computers from the United States. *Resources, Conservation and Recycling* 67, 67-74.
- Kantarelis, E., Donaj, P., Yang, W., Zabaniotou, A., 2009. Sustainable valorization of plastic wastes for energy with environmental safety via High-Temperature Pyrolysis (HTP) and High-Temperature Steam Gasification (HTSG). *J. Hazard. Mater.* 167, 675-684.
- Karagiannidis, A., Perkoulidis, G., 2009. A multi-criteria ranking of different technologies for the anaerobic digestion for energy recovery of the organic fraction of municipal solid wastes. *Bioresour. Technol.* 100, 2355-2360.
- Keeney R.L., Raiffa H., (1976), *Decisions with multiple objectives: preferences and value tradeoffs*, John Wiley and Sons, New York.
- Khoo, H.H., Lim, T.Z., Tan, R.B.H., 2010. Food waste conversion options in Singapore: Environmental impacts based on an LCA perspective. *Sci. Total Environ.* 408, 1367-1373.
- Knoeri, C., Binder, C.R., Althaus, H.-J., 2011. Decisions on recycling: Construction stakeholders' decisions regarding recycled mineral construction materials. *Resources, Conservation and Recycling* 55, 1039-1050.
- Komilis, D., Evangelou, A., Giannakis, G., Lymperis, C., 2012. Revisiting the elemental composition and the calorific value of the organic fraction of municipal solid wastes. *Waste Manage.* 32, 372-381.
- Körner, I., Saborit-Sánchez, I., Aguilera-Corrales, Y., 2008. Proposal for the integration of decentralised composting of the organic fraction of municipal solid waste into the waste management system of Cuba. *Waste Manage.* 28, 64-72.
- Koroneos, C.J., Nanaki, E.A., 2012. Integrated solid waste management and energy production - a life cycle assessment approach: the case study of the city of Thessaloniki. *Journal of Cleaner Production* 27, 141-150.
- Koukouzas, N., Katsiadakis, A., Karlopoulos, E., Kakaras, E., 2008. Co-gasification of solid waste and lignite – A case study for Western Macedonia. *Waste Manage.* 28, 1263-1275.
- Kowalewski, R., Reid Lea, W., Tittebaum, M., 1999. A standardized data reporting methodology for long-term integrated municipal solid waste management—a case study. *Journal of solid waste technology and management* 26 (1), 26-35.
- Kytzia, S., Faist, M., Baccini, P., 2004. Economically extended—MFA: a material flow approach for a better understanding of food production chain. *Journal of Cleaner Production* 12, 877-889.

- Lai, C.-M., Ke, G.-R., Chung, M.-Y., 2009. Potentials of food wastes for power generation and energy conservation in Taiwan. *Renewable Energy* 34, 1913-1915.
- Lang, D.J., Binder, C.R., Scholz, R.W., Schleiss, K., Stäubli, B., 2006. Impact factors and regulatory mechanisms for material flow management: Integrating stakeholder and scientific perspectives: The case of bio-waste delivery. *Resources, Conservation and Recycling* 47, 101-132.
- Langerman, M.A., MacKinnon, R.J., 1991. Scaling considerations for modelling the in situ vitrification process. *Appl. Math. Model.* 15, 542-549.
- Larsen, A W.; Merrild, A.; *et al.* 2010. Waste Collection systems for recyclables : An environmental and economic assessment for the municipality of Aarhus, Denamark. *Waste management* 30 (5) p.744-754.
- Laurent, A., Bakas, I., Clavreul, J., Bernstad, A., Niero, M., Gentil, E., Hauschild, M.Z., Christensen, T.H., 2014. Review of LCA studies of solid waste management systems – Part I: Lessons learned and perspectives. *Waste Manage.* 34, 573-588.
- Lay, J., 2003. Influence of chemical nature of organic wastes on their conversion to hydrogen by heat-shock digested sludge. *International Journal of Hydrogen Energy* 28, 1361-1367.
- Lay, J.J., Li, Y.Y., Noike, T., 1998. Dynamics of methanogenic activities in a landfill bioreactor treating the organic fraction of municipal solid wastes. *Water Science and Technology* 38, 177-184.
- Le Têno, J.F., Mareschal, B., 1998. An interval version of PROMETHEE for the comparison of building products' design with ill-defined data on environmental quality. *European Journal of Operational Research* 109, 522-529.
- Lee, D.H., Behera, S.K., Kim, J.W., Park, H.-S., 2009. Methane production potential of leachate generated from Korean food waste recycling facilities: A lab-scale study. *Waste Manage.* 29, 876-882.
- Li, C., Champagne, P., Anderson, B.C., 2011. Evaluating and modeling biogas production from municipal fat, oil, and grease and synthetic kitchen waste in anaerobic co-digestions. *Bioresour. Technol.* 102, 9471-9480.
- Ljunggren Söderman, M., 2003. Recovering energy from waste in Sweden—a systems engineering study. *Resources, Conservation and Recycling* 38, 89-121.
- Lo, H.M., Kurniawan, T.A., Sillanpää, M.E.T., Pai, T.Y., Chiang, C.F., Chao, K.P., Liu, M.H., Chuang, S.H., Banks, C.J., Wang, S.C., Lin, K.C., Lin, C.Y., Liu, W.F., Cheng, P.H., Chen, C.K., Chiu, H.Y., Wu, H.Y., 2010. Modeling biogas production from organic fraction of MSW co-digested with MSWI ashes in anaerobic bioreactors. *Bioresour. Technol.* 101, 6329-6335.
- Luoranen, M., Soukka, R., Denafas, G., Horttanainen, M., 2009. Comparison of energy and material recovery of household waste management from the environmental point of view – Case Kaunas, Lithuania. *Applied Thermal Engineering* 29, 938-944.
- Macharis, C., Milan, L., 2015. Transition through dialogue: A stakeholder based decision process for cities: The case of city distribution. *Habitat International* 45, Part 2, 82-91.
- Mathilde Marchand. *Considération de la différenciation spatiale dans l'évaluation des impacts environnementaux locaux au moyen de l'Analyse du Cycle de Vie (ACV): application à la gestion des déchets ménagers.* Other. Université Rennes 1, 2013. French.
- Malczewski, J., 2004. GIS-based land-use suitability analysis: a critical overview. *Progress in Planning* 62, 3-65.

- Manfredi, S.; Niskanen, A.; et al. 2009. Environmental assessment of gas management options at the Old Ammässuo landfill (Finland) by means of LCA modeling (EASEWASTE). *Waste Management* 29 (5) p.1588-1594.
- Mareschal, B., Brans, J.-P., 1988. Geometrical representations for MCDA. *European Journal of Operational Research* 34, 69-77.
- Marshall, R.E., Farahbakhsh, K., 2013. Systems approaches to integrated solid waste management in developing countries. *Waste Manage.* 33, 988-1003.
- Mata-Alvarez, J., 1996. Biological Household Waste Treatment in Europe: second Aalborg International Conference. *Resources, Conservation and Recycling* 17, 67-73.
- Matinez-Blanco, J.; Munoz, P.; et al. 2011. Assesment of tomato Mediterranean production in open-field and standard multi-tunnel greenhouse, with compost or mineral fertilizer, from an agricultural and environmental standpoint. *Journal of Cleaner Production* 19 (9-10) p.137-140.
- Matsumoto, S., 2011. Waste separation at home: Are Japanese municipal curbside recycling policies efficient? *Resources, Conservation and Recycling* 55, 325-334.
- Matsuto, T., 2014. A comparison of Waste Management throughout Asian countries. *Waste Manage.* 34, 969-970.
- MacDonald, M., 1996a. Solid Waste Management models: a state of the art review. *Journal of solid waste technology and management* 23 (2), 73-83.
- McDougall, F., White, P., Franke, M., Hindle, P., 2001. *Integrated Solid Waste Management: A Life Cycle Inventory*. Blackwell Science, London.
- McKendry, P., 2002. Energy production from biomass (part 2): conversion technologies. *Bioresour. Technol.* 83, 47-54.
- Medina-Flores, J.M., Picón-Núñez, M., 2010. Modelling the power production of single and multiple extraction steam turbines. *Chemical Engineering Science* 65, 2811-2820.
- Miquel, G.; 1998. Les nouvelles techniques de recyclage et de valorisation des déchets ménagers et des déchets industriels banals. *Rapport Sénat n°415*.
- Min, F., Zhang, M., Zhang, Y., Cao, Y., Pan, W.-P., 2011. An experimental investigation into the gasification reactivity and structure of agricultural waste chars. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 92, 250-257
- MODECOM, 2008. Réalisation d'une campagne De caractérisation des Ordures Ménagères Suivant la méthode MODECOM, 213p.
- Morin, P., Marcos, B., Moresoli, C., Laflamme, C.B., 2010. Economic and environmental assessment on the energetic valorization of organic material for a municipality in Quebec, Canada. *Applied Energy* 87, 275-283.
- Morrissey, A.J., Browne, J., 2004. Waste management models and their application to sustainable waste management. *Waste Manage.* 24, 297-308.
- Morris, J., 1991. Source separation vs centralised processing: and avoided cost optimisation model provides some intriguing answers. *Journal of Resource Management and Technology* 19 (3), 133-140.
- Namuli, R., Jaumard, B., Awasthi, A., Pillay, P., 2013. Optimisation of biomass waste to energy conversion systems for rural grid-connected applications. *Applied Energy* 102, 1013-1021.

- Nasr, N., Elbeshbishy, E., Hafez, H., Nakhla, G., El Naggar, M.H., 2011. Bio-hydrogen production from thin stillage using conventional and acclimatized anaerobic digester sludge. *International Journal of Hydrogen Energy* 36, 12761-12769.
- Nasrullah, M., Vainikka, P., Hannula, J., Hurme, M., Kärki, J., 2014. Mass, energy and material balances of SRF production process. Part 1: SRF produced from commercial and industrial waste. *Waste Manage.* 34, 1398-1407.
- Nipattummakul, N., Ahmed, I.I., Kerdsuwan, S., Gupta, A.K., 2012. Steam gasification of oil palm trunk waste for clean syngas production. *Applied Energy* 92, 778-782.
- OER, 2014. Bilan Energique de la Réunion. Observatoire de l'Energie Réunion, Agence régionale de l'énergie Réunion.
- O.F, K., 2007. Recovery and recycling practices in municipal solid waste management in Lagos, Nigeria. *Waste Manage.* 27, 1139-1143.
- Palanichamy, C., Sundar Babu, N., Nadarajan, C., 2004. Renewable energy investment opportunities in Mauritius—an investor's perspective. *Renewable Energy* 29, 703-716.
- Parrot, L., Sotamenou, J., Dia, B.K., 2009. Municipal solid waste management in Africa: Strategies and livelihoods in Yaoundé, Cameroon. *Waste Manage.* 29, 986-995.
- Passarini, F., Vassura, I., Monti, F., Morselli, L., Villani, B., 2011. Indicators of waste management efficiency related to different territorial conditions. *Waste Manage.* 31, 785-792.
- Pattnaik, S., Reddy, M.V., 2010. Assessment of Municipal Solid Waste management in Puducherry (Pondicherry), India. *Resources, Conservation and Recycling* 54, 512-520.
- Pavan, M., Todeschini, R., 2009. 1.19 - Multicriteria Decision-Making Methods, in: Walczak, S.D.B.T. (Ed.), *Comprehensive Chemometrics*. Elsevier, Oxford, pp. 591-629. Pavan, M., Todeschini, R., 2009. 1.19 - Multicriteria Decision-Making Methods, in: Walczak, S.D.B.T. (Ed.), *Comprehensive Chemometrics*. Elsevier, Oxford, pp. 591-629.
- PER, 2010. Développement de filières courtes bois énergie dans les Hauts de La Réunion. Pôle d'Excellence Rurale, Réseau Rural Français.
- Pérez, J.F., Melgar, A., Benjumea, P.N., 2012. Effect of operating and design parameters on the gasification/combustion process of waste biomass in fixed bed downdraft reactors: An experimental study. *Fuel* 96, 487-496.
- Perkoulidis, G., Papageorgiou, A., Karagiannidis, A., Kalogirou, S., 2010. Integrated assessment of a new Waste-to-Energy facility in Central Greece in the context of regional perspectives. *Waste Manage.* 30, 1395-1406.
- Petters, G M.; Rowley.; 2009. Environmental comparison of biosolids management systems using life cycle assessment. *Environmental Science and Technology* 43 (8) p. 2674-2679.
- Petts, J., 2000. Municipal waste management: inequities and the role of deliberation. *Risk Analysis* 20(6), 821-832.
- Pfister, F., Bader, H.P., Scheidegger, R., Baccini, P., 2005. Dynamic modelling of resource management for farming systems. *Agricultural Systems* 86, 1-28.
- Phillips, P.S., Tudor, T., Bird, H., Bates, M., 2011. A critical review of a key Waste Strategy Initiative in England: Zero Waste Places Projects 2008-2009. *Resources, Conservation and Recycling* 55, 335-343.
- Pires, A., Martinho, G., Chang, N.-B., 2011. Solid waste management in European countries: A review of systems analysis techniques. *J. Environ. Manage.* 92, 1033-1050.

- PPDGDND, 2014. Plan de prévention des déchets non dangereux. SAFEGE, 190p.
- Pognani, M., Barrena, Raquel, Font, Xavier, Adani, Fabrizio, Scaglia, Barbara, Sánchez, Antoni, 2011. Evolution of organic matter in a full-scale composting plant for the treatment of sewage sludge and biowaste by respiration techniques and pyrolysis-GC/MS. *Bioresour. Technol.* 102, 4536-4543.
- Pohekar, S.D., Ramachandran, M., 2004. Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 8, 365-381.
- Pommier, S., Llamas, A.M., Lefebvre, X., 2010. Analysis of the outcome of shredding pretreatment on the anaerobic biodegradability of paper and cardboard materials. *Bioresour. Technol.* 101, 463-468.
- Ponsá, S., Gea, T., Sánchez, A., 2011. Anaerobic co-digestion of the organic fraction of municipal solid waste with several pure organic co-substrates. *Biosys. Eng.* 108, 352-360.
- Powell, J., 2000. The potential for using life cycle inventory analysis in local authority waste management decision making. *Journal of Environmental Planning and Management* 43 (3), 351–367.
- Praene, J.P., David, M., Sinama, F., Morau, D., Marc, O., 2012. Renewable energy: Progressing towards a net zero energy island, the case of Reunion Island. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, 426-442.
- Purcell, M., Magette, W.L., 2010. Attitudes and behaviour towards waste management in the Dublin, Ireland region. *Waste Manage.* 30, 1997-2006.
- Qiao, W., Yan, X., Ye, J., Sun, Y., Wang, W., Zhang, Z., 2011. Evaluation of biogas production from different biomass wastes with/without hydrothermal pretreatment. *Renewable Energy* 36, 3313-3318.
- Radojevic, D., Petrovic, S., 1997. A fuzzy approach to preference structure in multicriteria ranking. *International Transactions in Operational Research* 4, 419-430.
- Raiffa, H.; 1968. Preference of muti-attributed alternatives. RAND Memorandum, RM-5868-DOT/RC.
- Rakotonarivo, N.; 2013. Approche dynamique du bilan carbone de l'énergie consommé et de l'énergie grise dans un espace bâti.
- Ramjeawon, T., 2008. Life cycle assessment of electricity generation from bagasse in Mauritius. *Journal of Cleaner Production* 16, 1727-1734.
- Ranganathan, S., Ramachandra Rao, P., 2010. Thermodynamic modelling of the spontaneous vitrification process using transformation diagrams. *Calphad* 34, 387-392.
- Rao, M.S., Singh, S.P., 2004. Bioenergy conversion studies of organic fraction of MSW: kinetic studies and gas yield–organic loading relationships for process optimisation. *Bioresour. Technol.* 95, 173-185.
- Raposo, F., Fernández-Cegri, V., De la Rubia, M.A., Borja, R., Béline, F., Cavinato, C., Demirer, G., Fernández, B., Fernández-Polanco, M., Frigon, J.C., Ganesh, R., Kaparaju, P., Koubova, J., Méndez, R., Menin, G., Peene, A., Scherer, P., Torrijos, M., Uellendahl, H., Wierinck, I., de Wilde, V., 2011. Biochemical methane potential (BMP) of solid organic substrates: evaluation of anaerobic biodegradability using data from an international interlaboratory study. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology* 86, 1088-1098.

- Refsgaard, K., Magnussen, K., 2009. Household behaviour and attitudes with respect to recycling food waste – experiences from focus groups. *J. Environ. Manage.* 90, 760-771.
- Riber, C.; Bhandar, G.; et al. 2008. Environmental assessment of waste incineration in a life-cycle perspective (EASEWASTE). *Waste Management and Research* 26 (1) p.96-103.
- Rousseau, A.; 2010. Schéma Directeur Biomasse Energie, Phase 1. ARER – EIE Espaces Informations et Conseils, 76 p.
- Roy, B.; 1985. *Multicriteria Methodology for Decision Aiding*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1996. Original version in French “Methodologie Multicritères d’Aide à la Décision”, Economica, Paris.
- Roy, B.; 1991. The outranking approach and the foundations of ELECTRE methods. *Theory and Decision*, 31:49-73.
- Roy, B.; Bouyssson, D.;1993. *Aide Multicritères à la Décision : Méthodes et Cas*. Economica, Paris.
- Saaty, T.L. ; 1980. *The Analytic hierarchy process*. McGraw-Hill, New-York.
- Sabbas, T., Poletini, A., Pomi, R., Astrup, T., Hjelmar, O., Mostbauer, P., Cappai, G., Magel, G., Salhofer, S., Speiser, C., Heuss-Assbichler, S., Klein, R., Lechner, P., 2003. Management of municipal solid waste incineration residues. *Waste Manage.* 23, 61-88.
- Salhofer, S., Wassermann, G., Binner, E., 2007. Strategic environmental assessment as an approach to assess waste management systems. Experiences from an Austrian case study. *Environ. Model. Software* 22, 610-618.
- Schmieder, H., Abeln, J., Boukis, N., Dinjus, E., Kruse, A., Kluth, M., Petrich, G., Sadri, E., Schacht, M., 2000. Hydrothermal gasification of biomass and organic wastes. *The Journal of Supercritical Fluids* 17, 145-153.
- Schmitt, E., Bura, R., Gustafson, R., Cooper, J., Vajzovic, A., 2012. Converting lignocellulosic solid waste into ethanol for the State of Washington: An investigation of treatment technologies and environmental impacts. *Bioresour. Technol.* 104, 400-409.
- Schoot Uiterkamp, B.J., Azadi, H., Ho, P., 2011. Sustainable recycling model: A comparative analysis between India and Tanzania. *Resources, Conservation and Recycling* 55, 344-355.
- Shahjahan H, B., 2010. A crisis in governance: Urban solid waste management in Bangladesh. *Habitat International* 34, 125-133.
- Sharma, A.K., 2011. Modeling and simulation of a downdraft biomass gasifier 1. Model development and validation. *Energy Conversion and Management* 52, 1386-1396.
- Shigeru, M., 2011. Waste separation at home: Are Japanese municipal curbside recycling policies efficient? *Resources, Conservation and Recycling* 55, 325-334.
- Shmelev, S.E., Powell, J.R., 2006. Ecological-economic modelling for strategic regional waste management systems. *Ecol. Econ.* 59, 115-130.
- Singh, J., Gu, S., 2010. Commercialization potential of microalgae for biofuels production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, 2596-2610.
- Sokka, L., Antikainen, R., Kauppi, P.E., 2007. Municipal solid waste production and composition in Finland—Changes in the period 1960–2002 and prospects until 2020. *Resources, Conservation and Recycling* 50, 475-488.
- Stewart, T.J., 1992. A critical survey on the status of multiple criteria decision making theory and practice. *Omega* 20, 569-586.

- Sufian, M.A., Bala, B.K., 2007. Modeling of urban solid waste management system: The case of Dhaka city. *Waste Manage.* 27, 858-868.
- Šulc, J., Štojdl, J., Richter, M., Popelka, J., Svoboda, K., Smetana, J., Vacek, J., Skoblja, S., Buryan, P., 2012. Biomass waste gasification – Can be the two stage process suitable for tar reduction and power generation? *Waste Manage.* 32, 692-700.
- Sundberg, J., Gipperth, P., Wene, C.O., 1994. A systems approach to municipal solid waste management: A pilot study of Göteborg. *Waste Manage. Res.* 12, 73-91.
- Talyan, V., Dahiya, R.P., Anand, S., Sreekrishnan, T.R., 2007. Quantification of methane emission from municipal solid waste disposal in Delhi. *Resources, Conservation and Recycling* 50, 240-259.
- Tambone, F., Scaglia, B., D'Imporzano, G., Schievano, A., Orzi, V., Salati, S., Adani, F., 2010. Assessing amendment and fertilizing properties of digestates from anaerobic digestion through a comparative study with digested sludge and compost. *Chemosphere* 81, 577-583.
- Tan, S.T., Ho, W.S., Hashim, H., Lee, C.T., Taib, M.R., Ho, C.S., 2015. Energy, economic and environmental (3E) analysis of waste-to-energy (WTE) strategies for municipal solid waste (MSW) management in Malaysia. *Energy Conversion and Management* 102, 111-120.
- Tanigaki, N., Manako, K., Osada, M., 2012. Co-gasification of municipal solid waste and material recovery in a large-scale gasification and melting system. *Waste Manage.* 32, 667-675.
- Thanh, N.P., Matsui, Y., Fujiwara, T., 2010. Household solid waste generation and characteristic in a Mekong Delta city, Vietnam. *J. Environ. Manage.* 91, 2307-2321.
- Theodoridou, I., Karteris, M., Mallinis, G., Papadopoulos, A.M., Hegger, M., 2012. Assessment of retrofitting measures and solar systems' potential in urban areas using Geographical Information Systems: Application to a Mediterranean city. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, 6239-6261.
- Tognetti, C., Mazzarino, M.J., Laos, F., 2011. Comprehensive quality assessment of municipal organic waste composts produced by different preparation methods. *Waste Manage.* 31, 1146-1152.
- Toller, S.; Kärrman, E.; et al. 2009. Environmental assessment of incinerator residue utilisation. *Waste Management* 29 (7) p.2071-2077.
- Umberto, A., 2012. Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review. *Waste Manage.* 32, 625-639.
- Unnikrishnan, S., Singh, A., 2010. Energy recovery in solid waste management through CDM in India and other countries. *Resources, Conservation and Recycling* 54, 630-640.
- Valdez-Vazquez, I., Poggi-Varaldo, H.M., 2009. Hydrogen production by fermentative consortia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13, 1000-1013.
- Van den Enden, P.J., Lora, E.S., 2004. Design approach for a biomass fed fluidized bed gasifier using the simulation software CSFB. *Biomass Bioenergy* 26, 281-287.
- Van Huylenbroeck, G., 1995. The conflict analysis method: bridging the gap between ELECTRE, PROMETHEE and ORESTE. *European Journal of Operational Research* 82, 490-502.
- Vandermeersch, T., Alvarenga, R.A.F., Ragaert, P., Dewulf, J., 2014. Environmental sustainability assessment of food waste valorization options. *Resources, Conservation and Recycling* 87, 57-64.

- Vego, G., Kučar-Dragičević, S., Koprivanac, N., 2008. Application of multi-criteria decision-making on strategic municipal solid waste management in Dalmatia, Croatia. *Waste Manage.* 28, 2192-2201.
- Vergara, S.E., Damgaard, A., Horvath, A., 2011. Boundaries matter: Greenhouse gas emission reductions from alternative waste treatment strategies for California's municipal solid waste. *Resources, Conservation and Recycling* 57, 87-97.
- Vetschera, R., 1992. A preference-preserving projection technique for MCDM. *European Journal of Operational Research* 61, 195-203.
- Vincke, Ph.; 1989. *Multi-criteria Decision Aid*. John Wiley & Sons, New-York, 1992. Original version in French "L'Aide Multicritère à la Décision", Edition de l'Université de Bruxelles-Edition Ellipses, Brussels.
- Vincke, Ph. (1992), *Muhicriteria Decision-aid*, Wiley, New York.
- Vuk, D., Koželj, B., Mladineo, N., 1991. Application of multicriterional analysis on the selection of the location for disposal of communal waste. *European Journal of Operational Research* 55, 211-217.
- Warmer Bulletin, 2000. Environmental impacts of transporting waste—life cycle and cost benefit assessments. *Warmer Bulletin* 73, 8-10.
- Wang, S., Archer, N.P., 1994. A neural network technique in modeling multiple criteria multiple person decision making. *Computers & Operations Research* 21, 127-142.
- Weisser, D., 2004. Costing electricity supply scenarios: A case study of promoting renewable energy technologies on Rodriguez, Mauritius. *Renewable Energy* 29, 1319-1347.
- Welsch, M., Hermann, S., Howells, M., Rogner, H.H., Young, C., Ramma, I., Bazilian, M., Fischer, G., Alfstad, T., Gielen, D., Le Blanc, D., Röhr, A., Steduto, P., Müller, A., 2014. Adding value with CLEWS – Modelling the energy system and its interdependencies for Mauritius. *Applied Energy* 113, 1434-1445.
- Whiting, A., Azapagic, A., 2014. Life cycle environmental impacts of generating electricity and heat from biogas produced by anaerobic digestion. *Energy* 70, 181-193.
- Wiek, A., Binder, C., Scholz, R.W., 2006. Functions of scenarios in transition processes. *Futures* 38, 740-766.
- Winkler, J., Bilitewski, B., 2007. Comparative evaluation of life cycle assessment models for solid waste management. *Waste Manage.* 27, 1021-1031.
- Wu, C., Williams, P.T., 2010. Pyrolysis-gasification of plastics, mixed plastics and real-world plastic waste with and without Ni-Mg-Al catalyst. *Fuel* 89, 3022-3032.
- Wu, X.F., Yang, Q., Xia, X.H., Wu, T.H., Wu, X.D., Shao, L., Hayat, T., Alsaedi, A., Chen, G.Q., 2015. Sustainability of a typical biogas system in China: Emergy-based ecological footprint assessment. *Ecological Informatics* 26, Part 1, 78-84.
- Xi, B.D., Su, J., Huang, G.H., Qin, X.S., Jiang, Y.H., Huo, S.L., Ji, D.F., Yao, B., 2010. An integrated optimization approach and multi-criteria decision analysis for supporting the waste-management system of the City of Beijing, China. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 23, 620-631.
- Xiao, X., Le, D.D., Morishita, K., Zhang, S., Li, L., Takarada, T., 2010. Multi-stage biomass gasification in Internally Circulating Fluidized-bed Gasifier (ICFG): Test operation of animal-waste-derived biomass and parametric investigation at low temperature. *Fuel Processing Technology* 91, 895-902.

- Xu, Z., Coors, V., 2012. Combining system dynamics model, GIS and 3D visualization in sustainability assessment of urban residential development. *Build. Environ.* 47, 272-287.
- Zaman, A.U., Lehmann, S., 2011. Urban growth and waste management optimization towards 'zero waste city'. *City, Culture and Society* 2, 177-187.
- Zhang, D.Q., Tan, S.K., Gersberg, R.M., 2010. Municipal solid waste management in China: Status, problems and challenges. *J. Environ. Manage.* 91, 1623-1633.
- Zhang, H., Matsuto, T., 2011. Comparison of mass balance, energy consumption and cost of composting facilities for different types of organic waste. *Waste Manage.* 31, 416-422.
- Zhang, Q., Dor, L., Fenigshtein, D., Yang, W., Blasiak, W., 2012. Gasification of municipal solid waste in the Plasma Gasification Melting process. *Applied Energy* 90, 106-112.
- Zhao, W.; Der Voet, E v, *et al*; 2009. Life cycle assessment of municipal solid waste management with regard to greenhouse gas emissions: Case study of Tianjin, China. *Science of the Total Environment* 407 (5) p.15176-1526.
- Zheng, Y., Chi, Z., Ahring, B.K., Chen, S., 2012. Oleaginous yeast *Cryptococcus curvatus* for biofuel production: Ammonia's effect. *Biomass Bioenergy* 37, 114-121.
- Zhou, X., Wang, F., Hu, H., Yang, L., Guo, P., Xiao, B., 2011. Assessment of sustainable biomass resource for energy use in China. *Biomass Bioenergy* 35, 1-11.
- Zhu, H., Parker, W., Basnar, R., Proracki, A., Falletta, P., Béland, M., Seto, P., 2008. Biohydrogen production by anaerobic co-digestion of municipal food waste and sewage sludges. *International Journal of Hydrogen Energy* 33, 3651-3659.
- Zotos, G., Karagiannidis, A., Zampetoglou, S., Malamakis, A., Antonopoulos, I.S., Kontogianni, S., Tchobanoglous, G., 2009. Developing a holistic strategy for integrated waste management within municipal planning: Challenges, policies, solutions and perspectives for Hellenic municipalities in the zero-waste, low-cost direction. *Waste Manage.* 29, 1686-1692.

Liste des figures

Figure 1 : Synthèse de la problématique générale.....	17
Figure 2 : Synthèse de la structuration et du contenu du manuscrit.....	22
Figure 3 : Synthèse de la démarche scientifique.....	23
Figure 4: Les questionnements de recherche qui constituent le cœur du chapitre : Quelles sont les approches scientifiques pour répondre à la problématique de gestion des déchets.....	28
Figure 5 : Classification considérée dans le manuscrit.....	36
Figure 6 : Synthèse de la réglementation autour des déchets.....	38
Figure 7 : Principe d'organisation des filières de traitement.....	54
Figure 8 : La gestion générale des déchets ménagers selon le type de collecte (source : HATIK, 2014)	54
Figure 9 : Organigramme de la gestion générale des déchets	56
Figure 10 : Principe d'organisation entre les types et les modes de collectes (source : HATIK, 2015). ..	58
Figure 11 : Systèmes de stockage existants (source : Avfall Sverige, 2013).....	58
Figure 12 : Récapitulatif des étapes de la gestion des principaux flux de déchets ménagers (source : HATIK, 2014).....	60
Figure 13 : Schéma type d'un centre de tri (source : star.re, 2014).....	60
Figure 14 : Présentation d'un mode de prétraitement par voie enzymatique (source : dongenergy.com, 2013)	63
Figure 15 : Les modes de valorisation des biodéchets (source : HATIK, 2014).....	65
Figure 16 : Organigramme des étapes de collecte et de tri	80
Figure 17 : Organigramme de l'étape de traitement des déchets primaires (source : HATIK 2015)	80
Figure 18 : Organigramme général de l'étape de traitement	82
Figure 19 : Les équipements actuels de traitement des déchets à la Réunion (source : HATIK, 2012) ..	87
Figure 20 : La synthèse des installations à mettre en place dans le cadre du PPGDND (source : PPGDND, 2014).....	89
Figure 21 : Synthèse des gisements et des voies de traitement (source : PPGDND, 2014).....	90
Figure 22 : Processus de traitement des boues de STEP par des micro-algues (source : Bioalgestal) .	94
Figure 23 : Synthèse des projets de valorisation énergétique de la biomasse	94
Figure 24 : Production électrique totale par type d'énergie en 2014.....	96
Figure 25 : Les flux énergétique de la Réunion (OER, 2011)	96
Figure 26 : Méthode générale de réalisation d'ACP (source : Raynaud, 2009).....	109
Figure 27: La répartition des variables	115
Figure 28 : La répartition des individus	116
Figure 29 : Les étapes de réalisation d'une analyse multicritères	123
Figure 30 : Synthèse de la démarche scientifique (source : HATIK, 2015)	135
Figure 31 : Synthèse du système (Durand, 2006).....	143
Figure 32 : Étapes du processus de modélisation (source : HATIK, 2015)	146
Figure 33 : Les étapes d'identification et de caractérisation des différents niveaux d'observation (source : HATIK, 2015).....	147
Figure 34 : Description générale de la démarche développée (source : HATIK, 2015).....	147
Figure 35 : Organisation des normes relatives à la mise en œuvre d'une ACV	151
Figure 36 : Les étapes de l'Analyse du Cycle de Vie : le cadre méthodologique.....	153

Figure 37 : Le déroulement de la méthode d'évaluation des données de l'inventaire (source : HATIK, 2015).....	155
Figure 38 : La classification des catégories d'impacts environnementaux	155
Figure 39 : Localisation de la gestion des déchets dans le cycle de vie d'un produit (source :HATIK, 2015).....	159
Figure 40 : Description de l'approche systémique et typologique au travers des niveaux d'observation (source : HATIK, 2015)	164
Figure 41 : L'environnement de l'outil de simulation (source : HATIK, 2015)	171
Figure 42 : Echelle d'observation et navigation au sein de l'outil de simulation (source : HATIK, 2015)	171
Figure 43 : Les étapes d'identification et de caractérisation des différents niveaux d'observation (source : HATIK, 2015)	178
Figure 44 : Description des niveaux d'observation (source : HATIK, 2015)	179
Figure 45 : Description des flux étudiés (source : HATIK, 2015)	183
Figure 46 : Description générale du système global d'observation de gestion des déchets (source : HATIK, 2015)	183
Figure 47 : Navigation au sein de l'outil : le choix du mode de traitement	187
Figure 48 : Présentation du Système Global d'Observation (source : HATIK, 2015).....	187
Figure 49 : L'identification de la phase de collecte et de transport.....	189
Figure 50 : Présentation de l'Unité Fonctionnelle de pré-tri et prétraitement	191
Figure 51 : Description de l'Opération Unitaire de prétraitement biologique	193
Figure 52 : Description de l'Opération Unitaire de tri mécanique.....	195
Figure 53 : Présentation de l'Unité Fonctionnelle d'incinération	197
Figure 54 : Navigation au sein de l'UF d'incinération (source : HATIK, 2015).....	197
Figure 55 : Description de l'Opération Unitaire d'alimentation du four (source : HATIK, 2015)	199
Figure 56 : Description de l'Opération Unitaire de combustion des déchets.....	201
Figure 57 : Description de l'Opération Unitaire d'extraction des mâchefers (source : HATIK, 2015)	203
Figure 58 : Présentation de la phase de traitement des produits induits (source : HATIK, 2015)	205
Figure 59 : Description de l'Opération Unitaire de production de vapeur d'eau	207
Figure 60 : Description de l'Opération Unitaire de production d'électricité	209
Figure 61 : Description de l'Opération Unitaire de traitement des fumées	211
Figure 62 : Présentation de l'Unité Fonctionnelle de gestion des extrants	213
Figure 63 : Représentation générale des filières de traitement des déchets	215
Figure 64 : Identification et choix des déchets à traiter.....	219
Figure 65 : Information sur le déchet à traiter	219
Figure 66 : Identification et choix du mode de traitement	219
Figure 67 : Description synoptique de la filière de traitement	221
Figure 68 : Description systémique de la filière de traitement.....	221
Figure 69 : Etat d'avancement de la description.....	223
Figure 70 : Page de description de l'UF de Collecte et de Transport	223
Figure 71 : Page de description de l'UF Traitement des déchets primaires.....	225
Figure 72 : Page de description de l'UF de Traitement des produits induits	225
Figure 73 : Page de description de l'UF de gestion des stocks.....	225
Figure 74 : Page de description de l'OU d'alimentation du four.....	227
Figure 75 : Page de description de l'OU de Combustion des déchets	227

Liste des figures

Figure 76 : Page des descriptions de l'OU d'Extraction des mâchefers	227
Figure 77 : Page d'acquisition de données pour l'OU d'alimentation du four.....	229
Figure 78 : Page d'acquisition de données pour l'OU de combustion des déchets	229
Figure 79 : Page d'acquisition de données pour l'OU d'extraction des mâchefers	229
Figure 80 : Page d'acquisition de données de l'analyse des flux pour le composant Four de l'OU Combustion	231
Figure 81 : Page d'acquisition de données économiques et environnementales pour le composant Four de l'OU Combustion	231
Figure 82 : Présentation des sorties graphiques pour la consommation et la production énergétique pour le SGO.....	236
Figure 83 : Présentation des sorties graphiques pour la consommation et la production pour l'UF de combustion.....	236
Figure 84 : Présentation des sorties graphiques de la consommation et la production pour l'OU d'alimentation du four	236
Figure 85 : Présentation des sorties graphiques du bilan carbone pour le SGO.....	237
Figure 86 : Présentation des sorties graphiques du bilan carbone pour l'UF de combustion	237
Figure 87 : Présentation des sorties graphiques de bilan carbone pour les OU d'alimentation du four	237
Figure 88 : Présentation des sorties graphiques des coûts d'opérateurs et d'amortissement pour le SGO	238
Figure 89 : Description de la page d'accueil des UF : exemple de la collecte	239
Figure 90 : Acquisition de données des flux liés au composant pour l'OU de collecte.....	239
Figure 91 : Acquisition de données des paramètres économiques au sein de l'OU de collecte.....	240
Figure 92 : Acquisition de données de l'UF de collecte pour les flux liés aux opérateurs	240
Figure 93 : Acquisition de données de l'UF de collecte des paramètres économiques liés aux opérateurs	241
Figure 94 : Etape de navigation intermédiaire entre deux UF : Etat d'avancement.....	241
Figure 95 : Organigramme synthétique de la navigation au sein de l'outil illustré par l'UF d'incinération, l'OU de combustion et l'acquisition de données au niveau du four	242
Figure 96: Méthodologie générale d'estimation des biodéchets générés et de l'analyse des données	250
Figure 97 : Présentation de la classification des biodéchets appliquée à l'étude de cas	251
Figure 98 : Méthodologie pour l'obtention des tonnages de FFOM présents dans les OM	260
Figure 99: Répartition des déchets organiques des ménages et des collectivités.....	267
Figure 100 : Répartition des habitats individuels par communes.....	267
Figure 101 : Répartition des effluents agricoles par communes exprimée en tonnes par an (2010).	269
Figure 102 : Répartition des zones d'élevages (source : BOS, 2010)	271
Figure 103 : Répartition des déchets organiques produits par le domaine de l'industrie exprimée en tonnes par an (2010)	271
Figure 104 : Synthèse des tonnages en matières organiques obtenus par flux	273
Figure 105 : La production en déchets organiques par communes.....	273
Figure 106 : Répartition des déchets organiques à la Réunion (t_{MO}/an).....	276
Figure 107 : Box plot des gisements étudiés.....	281
Figure 108: Nuage de points correspondant aux variables boues et effluents	283
Figure 109: Nuage de points correspondant aux variables boues et FFOM	285

Liste des figures

Figure 110 : Digramme des valeurs propres	296
Figure 111 : Graphique des individus (communes).....	300
Figure 112 : graphique des variables (flux de déche.....	300
Figure 113 : Présentation de l'approche utilisée	309
Figure 114 : Synthèse de la méthode d'obtention des sites potentiels.....	311
Figure 115 : Présentation de la construction du tableau de performance des sites	315
Figure 116 : Organisation des critères liés aux sites	316
Figure 117 : Tableau de performance des sites potentiels	320
Figure 118 : Classement des sites potentiels sélectionnés pour la commune de la Possession.....	321
Figure 119 : Classement des sites potentiels sélectionnés pour la commune de Salazie	323
Figure 120 : Classement des sites potentiels sélectionnés pour la commune de Saint-Paul.....	325
Figure 121 : Classement des sites potentiels sélectionnés pour la commune du Tampon	326
Figure 122 : Schéma synthétique des scenarii de gestion des déchets selon une collecte à deux voies	333
Figure 123 : Schéma synthétique des scenarii de gestion des déchets selon une collecte à trois voies	333
Figure 124 : Les prétraitements et traitement envisagés dans une collecte à deux voies	335
Figure 125 : Les prétraitements et traitements envisagés dans une collecte à trois voies	335
Figure 126 : Schéma synthétique des scenarii possibles avec un prétraitement	337
Figure 127 : Schéma synthétique des scenarii possibles avec Traitement enzymatique	337
Figure 128 : Synopsis des différentes options de scénarios possibles	340
Figure 129 : Présentation systémique des scénarios permettant la production d'électricité	344
Figure 130 : Présentation du scénario Sc1	345
Figure 131 : Présentation du scénario Sc2	345
Figure 132 : Présentation du scénario Sc3	346
Figure 133 : Présentation du scénario Sc4	347
Figure 134 : <i>Présentation du scénario Sc5</i>	347
Figure 135 : Présentation des scénarios Sc6 et Sc7	348
Figure 136 : Présentation du scénario Sc8	349
Figure 137 : Présentation du scénario Sc9	349
Figure 138 : Présentation du scénario Sc10	349
Figure 139 : Présentation des scénarios Sc11	350
Figure 140 : Présentation des scénarios Sc12 et Sc13	351
Figure 141 : L'organisation des critères liés aux scénarios	353
Figure 142 : Echelles d'évaluation des nuisances environnementales	354
Figure 143 : Présentation de la construction du tableau de performance pour les critères : environnemental et économique.....	356
Figure 144 : Echelle d'évaluation de l'acceptabilité de la population.....	358
Figure 145 : Echelle d'évaluation de la technicité.....	359
Figure 146 : Echelle d'évaluation de la technologie utilisée	360
Figure 147 : Synthèse des classements obtenus pour chaque scénario et pour chaque Hypothèses	362
Figure 148 : Scénarios issus du PPDGDND pour le traitement des déchets résiduels des ordures ménagères.....	370

Liste des figures

Liste des tableaux

Tableau 1 : Synthèse de la production des déchets par région en 2012 et la production estimée pour 2025.....	44
Tableau 2 : La production de déchets en Europe en 2010 exprimée en million de tonnes.....	44
Tableau 3 : La production de biodéchets en France métropolitaine en 2010	45
Tableau 4 : Les tonnages de déchets organiques recensés à la Réunion.....	46
Tableau 5 : Composition (%) des OMR et de la CS	47
Tableau 6 : Présentation des projets envisagés sur la Réunion	92
Tableau 7 : Analogie entre le photographe et l'ACP	108
Tableau 8 : Présentations de quelques logiciels d'ACP	111
Tableau 9 : Notes des élèves par matières.....	112
Tableau 10 : Matrice des corrélations.....	113
Tableau 11 : Les valeurs propres	114
Tableau 12 : Contributions des variables (%)	117
Tableau 13 : Contributions des individus (%)	117
Tableau 14 : Présentation des variables.....	119
Tableau 15 : Présentation des individus.....	120
Tableau 16 : Présentation des méthodes d'agrégation et des logiciels utilisés (source : Chakhar, 2006)	125
Tableau 17 : Présentation des critères d'évaluation des sites d'implantation et des scénarios de gestion.....	127
Tableau 18 : Synthèse des normes constituant le cadre de l'ACV	151
Tableau 19 : Synthèse des logiciels ACV.....	157
Tableau 20 : Synthèse des logiciels d'ACV appliqués à la gestion des déchets.....	161
Tableau 21 : Présentation des paramètres économiques autour des composants.....	181
Tableau 22 : Présentation des paramètres environnementaux : le Bilan Carbone	181
Tableau 23 : Présentation des paramètres environnementaux liés aux opérateurs	181
Tableau 24 : Présentation des paramètres économiques liés aux opérateurs.....	181
Tableau 25 : Synthèse des calculs par flux de déchets.....	254
Tableau 26 : Synthèse des références utilisées.....	255
Tableau 27 : Synthèse des données utilisées pour la quantification des gisements issus de la restauration collective.....	257
Tableau 28 : Ratios HAU	259
Tableau 29: Production annuelle de déjection par espèces ainsi que le temps de présence en bâtiment	262
Tableau 30 : Coefficients UGB des bovins.....	262
Tableau 31 : Activités et ratios de production considérés	265
Tableau 32 : Répartition de la population dans les trois principaux pôles urbains	268
Tableau 33 : Pourcentage de surface d'élevage par communes	269
Tableau 34 : Synthèse des résultats obtenus pour la Réunion	275
Tableau 35 : Synthèse des résultats obtenus pour l'analyse descriptive.....	279
Tableau 36 : Matrice de corrélation entre les variables boues et effluents	283
Tableau 37 : Matrice de corrélation entre les variables santé et hôtel	285
Tableau 38 : Matrice de corrélation des variables étudiées	289

Tableau 39 : Matrice de corrélation entre les variables et les individus.....	293
Tableau 40 : Les pourcentages d'inertie des 5 premiers axes	296
Tableau 41 : Données numériques des coordonnées, des contributions et des cosinus obtenus pour les individus	301
Tableau 42 : Données numériques des coordonnées, des contributions et des cosinus carré pour les variables	302
Tableau 43 : Corrélations entre les variables et les facteurs	303
Tableau 44 : Récapitulatif des groupements de communes.....	304
Tableau 45 : Scénarios de pondération.....	318
Tableau 46 : Synthèse de la répartition des sites.....	319
Tableau 47 : Zoom sur le classement des sites de la Possession	322
Tableau 48 : Zoom sur le classement des 3 sites potentiels pour l'implantation d'unités de traitement sur l'île	322
Tableau 49 : Zoom sur les données chiffrées des sites potentiels de la commune de Salazie	324
Tableau 50 : Zoom sur les données chiffrées des sites potentiels de la commune de Saint-Paul.....	326
Tableau 51 : Zoom sur les données chiffrées des sites potentiels de la commune du Tampon.....	327
Tableau 52 : Synthèse de l'organisation des scénarios	339
Tableau 53 : Synthèse des scenarii envisageables	341
Tableau 54: Synthèse des scénarios retenus	343
Tableau 55 : Présentation de la construction du tableau de performance pour les critères : environnemental et économique.....	355
Tableau 56: Présentation de la construction des tableaux de performance pour les critères : social et technologique.....	356
Tableau 57 : Hypothèse de pondération des scénarios de gestion et de traitement.....	361
Tableau 58 : Tableau de performance des scénarios pour les critères : environnemental et économique.....	363
Tableau 59 : Tableau de performance des scénarios pour les critères : social et technologique	364

Summary

Today's consumer society is generating a lot of pollution and waste . The exponential growth of garbage must lead us to rethink the way we consume and the way we consider the current system. Raising awareness of the damage is the best way to improve the situation so as to achieve better and more efficient results. That is why we chose to study waste management , to answer these objectives and to establish waste management scenarios adapted to a specific territory , here Reunion Island. Thereby, this study will contribute to the general development of insular territories.

For the study , we have implemented a methodology allowing us to build waste management scenarios . To create these , we have developed a simulation and modelisation tool for waste treatment and waste management.

The methodology is organized in two parts : i) A description phase and ii) A quantification phase for each scenario of waste management. i) The description phase enables us to know and classify all the entities that compose the waste treatment system as well as raw flow and energy flow. For this , each part of a scenario can be divided into elementary components to simplify their creation. ii) The quantification phase is operational once all flows and entities are identified. This phase consists in defining and quantify all the parameters (flows and entities).

Afterwards, we have developed a simulation and modelisation tool for waste treatment and waste management to create scenarios. Each scenario requires environmental, economic and social parameters. At this stage, we can collect data for all management phases and establish a panel of scenarios.

After scenarios are integrated in the tool, we can do a multi-criteria analysis to classify all possible alternatives that will help decision making . This analysis has proved relevant for choosing the best management and waste treatment scenarios. It also allows us to conduct a study that is as little oriented as possible , so as to ensure the reliability of the choices and decisions that will be selected .

Keys-words: Reasoned waste management, Scenario, Systemic analysis , Simulation tool, Multi-criteria analysis, Decision help.

Résumé

La société de consommation dans laquelle, nous évoluons est génératrice de beaucoup de pollutions notamment de déchets. Cette croissance exponentielle de détritits, nous amène à reconsidérer nos habitudes de consommation et notre vision du système actuel. C'est dans une réelle prise de conscience des dégâts occasionnés que nous pourrions agir pour améliorer ces failles dans un but d'optimisation et de performances. C'est pourquoi, nous avons choisi d'étudier la gestion des déchets afin de pouvoir répondre à ces objectifs et proposer des scénarios de gestion et de traitement des déchets adaptés aux territoires étudiés. Pour mener à bien cette étude, nous nous sommes intéressés à l'île de la Réunion permettant ainsi à contribuer au développement des territoires insulaires.

Autour de cette problématique, nous nous sommes attachés principalement à développer une démarche méthodologique permettant de composer différents scénarios de déchets. Afin de réaliser la création des scénarios, nous avons mis en œuvre un outil de simulation et de modélisation de traitement et de gestion des déchets.

Pour cela, nous avons développé une méthode qui se déroule en deux parties: 1) Une phase de description et 2) une phase de caractérisation. L'approche descriptive, nous permet de présenter de manière intelligible toutes les entités qui composent le système de traitement des déchets ainsi que les flux de matière et d'énergie qui interfèrent avec les systèmes observés. Une fois, cette phase d'identification réalisée et où toutes les entités (flux et systèmes) sont clairement définies, nous poursuivons par une phase de caractérisation. L'approche de caractérisation, nous permet de définir et de renseigner tous les paramètres liés aux flux et aux systèmes préalablement identifiés.

Sur cette base, nous avons mis au point un outil de simulation de gestion et de traitement des déchets. La conception de l'outil, nécessite donc une connaissance précise des éléments constituant chacun des niveaux d'observation étudiés. Cette observation du système par l'observation des flux, nous a permis de mettre en évidence les phases de traitement autour des étapes de stockage, de transport et de transformation. C'est notamment au travers de ces indices qu'il nous a été possible d'identifier les paramètres de gestion à considérer afin de répondre à nos problématiques de coûts et d'environnement. A ce stade, l'outil permet une acquisition de données détaillées à toutes les phases de gestion afin d'établir un certain nombre de scénarii de gestion des déchets.

Une fois, les scénarios mis en œuvre dans l'outil, une analyse multicritères développée est réalisée afin permettre le classement des différentes alternatives possibles dans un but d'aide à la décision. Cette analyse s'est avérée pertinente dans le choix des meilleurs scénarios de gestion et de traitement des déchets. Et nous permet de conduire une réflexion la moins orientée possible afin d'assurer une bonne crédibilité des choix et des décisions à retenir.

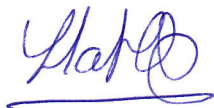
Mots-clés : Gestion raisonnée des déchets ; Scénarios ; Analyse systémique ; Outil de simulation, Analyse Multicritères, Aide à la décision.

**LETTRE D'ENGAGEMENT DE NON-PLAGIAT
A INSERER AU DEBUT DU MANUSCRIT DE THESE**

Je, soussigné(e) Christelle HATIK....., en ma qualité de doctorant(e) de l'Université de La Réunion, déclare être conscient(e) que le plagiat est un acte délictueux passible de sanctions disciplinaires. Aussi, dans le respect de la propriété intellectuelle et du droit d'auteur, je m'engage à systématiquement citer mes sources, quelle qu'en soit la forme (textes, images, audiovisuel, internet), dans le cadre de la rédaction de ma thèse et de toute autre production scientifique, sachant que l'établissement est susceptible de soumettre le texte de ma thèse à un logiciel anti-plagiat.

Fait à Tampon....., le (date) 25/11/2015.....

Signature :



Extrait du Règlement intérieur de l'Université de La Réunion
(validé par le Conseil d'Administration en date du 11 décembre 2014)

Article 9. Protection de la propriété intellectuelle – Faux et usage de faux, contrefaçon, plagiat

L'utilisation des ressources informatiques de l'Université implique le respect de ses droits de propriété intellectuelle ainsi que ceux de ses partenaires et plus généralement, de tous tiers titulaires de ces droits.

En conséquence, chaque utilisateur doit :

- utiliser les logiciels dans les conditions de licences souscrites ;
- ne pas reproduire, copier, diffuser, modifier ou utiliser des logiciels, bases de données, pages Web, textes, images, photographies ou autres créations protégées par le droit d'auteur ou un droit privatif, sans avoir obtenu préalablement l'autorisation des titulaires de ces droits.

La contrefaçon et le faux

Conformément aux dispositions du code de la propriété intellectuelle, toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle d'une œuvre de l'esprit faite sans le consentement de son auteur est illicite et constitue un délit pénal.

L'article 444-1 du code pénal dispose : « Constitue un faux toute altération frauduleuse de la vérité, de nature à causer un préjudice et accomplie par quelque moyen que ce soit, dans un écrit ou tout autre support d'expression de la pensée qui a pour objet ou qui peut avoir pour effet d'établir la preuve d'un droit ou d'un fait ayant des conséquences juridiques ».

L'article L335_3 du code de la propriété intellectuelle précise que : « Est également un délit de contrefaçon toute reproduction, représentation ou diffusion, par quelque moyen que ce soit, d'une œuvre de l'esprit en violation des droits de l'auteur, tels qu'ils sont définis et réglementés par la loi. Est également un délit de contrefaçon la violation de l'un des droits de l'auteur d'un logiciel (...) ».

Le plagiat est constitué par la copie, totale ou partielle d'un travail réalisé par autrui, lorsque la source empruntée n'est pas citée, quel que soit le moyen utilisé. Le plagiat constitue une violation du droit d'auteur (au sens des articles L 335-2 et L 335-3 du code de la propriété intellectuelle). Il peut être assimilé à un délit de contrefaçon. C'est aussi une faute disciplinaire, susceptible d'entraîner une sanction.

Les sources et les références utilisées dans le cadre des travaux (préparations, devoirs, mémoires, thèses, rapports de stage...) doivent être clairement citées. Des citations intégrales peuvent figurer dans les documents rendus, si elles sont assorties de leur référence (nom d'auteur, publication, date, éditeur...) et identifiées comme telles par des guillemets ou des italiques.

Les délits de contrefaçon, de plagiat et d'usage de faux peuvent donner lieu à une sanction disciplinaire indépendante de la mise en œuvre de poursuites pénales.