
Pilotage durable des déchets ménagers dans un cadre d'économie circulaire

Jorge Osorio¹, Daniel Roy¹, Sophie Hennequin¹, Charles Stirnweiss², Serge Winckelmuller²

1. LGIPM, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Metz
CS 65820, 1 route d'Ars Laquenexy, F-57078 Metz Cedex 03
jo.osorio@enim.fr, roy@enim.fr, hennequin@enim.fr

2. SYDEME, 12 place Robert Schumann, F-57600 Forbach
stirnweiss.charles@yahoo.fr, s.winkelmuller@sydeme.fr

RÉSUMÉ. Les pays développés ont réalisé depuis quelques décennies que la prospérité et le développement socio-économique sont basés sur l'utilisation excessive de ressources naturelles non renouvelables. De plus, le modèle économique suivi génère de multiples contaminations des sols, de l'air et de l'eau. Il est donc devenu impératif d'agir et ce dès la génération de ces problèmes. C'est pourquoi, dans cet article, nous nous intéressons à la gestion des déchets ménagers. Dans ce cadre, l'objectif est d'étudier, d'une part, les cycles d'économie circulaire d'un système réel de gestion des déchets ménagers. Et, d'autre part, de proposer et généraliser des méthodes formelles de conception/optimisation et de pilotage durable d'un système de gestion des déchets à base d'indicateurs industriels permettant de prendre en compte pleinement la notion de développement durable. Les travaux développés ont été réalisés en collaboration avec le Sydeme (Syndicat Mixte de Transport et de Traitement des Déchets de Moselle-Est).

ABSTRACT. Developed countries have realized in recent decades that the prosperity and socio-economic development are based on the excessive use of natural resources. In addition, the actual economic model generates multiple contaminations of soil, air and water. Therefore, it is imperative to act right from the generation of these problems. This is why, in this work, we are interested in wastes management and particularly household wastes. In this context, the aim of this paper is to propose and generalize firstly a formal model to include the management of household wastes in a circular economy framework. And secondly, we propose a dashboard for controlling / optimizing the wastes management system based on industrial indicators, allowing a complete consideration of sustainable development concept. Developed work was done in collaboration with the Sydeme (East-Moselle joint syndicate for waste transport and treatment).

MOTS-CLÉS : déchets ménagers, développement durable, cycles d'économie circulaire, tableau de bord, pilotage durable.

KEYWORDS: household wastes, sustainable development, circular economy cycles, dashboard, sustainable control.

DOI:10.3166/JESA.49.635-657 © Lavoisier 2016

1. Introduction

Le rapport « The limits to growth », publié en 1972 et commandé par le Club de Rome (MIT, 1972) permet d'affirmer, sur la base de simulations numériques réalisées au MIT, que le modèle socio-économique alors majoritairement adopté (et actuellement toujours suivi) engendre des problèmes qui remettent en cause l'équilibre de la vie sur terre. De fait, il devient urgent d'aborder sous un angle nouveau les problèmes démographiques, industriels, de pollution, de production alimentaire, de consommation énergétique et de matières premières. C'est l'acte de naissance de l'idée d'un développement durable (Rapport Bruntland, 1987).

Il est impératif de définir de nouveaux modèles pour agir conjointement sur les trois piliers du développement durable (Boutaud, 2005), à savoir : les piliers économique, environnemental et social/sociétal. Sur le plan environnemental, il faut : avoir une utilisation et une gestion durable des ressources naturelles (air, eau, sol, vie) et des savoirs humains ; maintenir les grands équilibres naturels (climat, diversité biologique, océans, forêts...) ; maîtriser l'énergie et les ressources non renouvelables (pétrole, gaz, charbon, minerais...). Sur le plan économique, le développement doit : être respectueux des milieux naturels d'où proviennent les ressources de base (agriculture et pêche) ; intégrer un changement profond dans les relations économiques internationales afin de promouvoir un commerce équitable et un tourisme solidaire et exiger que les entreprises prennent en compte les conditions du développement durable ; annuler la dette des pays pauvres et augmenter les investissements de façon à ne plus opter pour des profits à court terme en contradiction avec leur développement et celui de la planète ; réfléchir à une décroissance soutenable dans les pays développés au minimum sur la consommation énergétique. Les facteurs sociaux/sociétaux du développement durable sont l'accès à l'éducation, l'habitat, l'alimentation, les soins... afin de pouvoir satisfaire les besoins essentiels des populations ; combattre l'exclusion sous toutes ses formes (sociale, professionnelle...) ; stabiliser la croissance démographique et maîtriser la croissance urbaine et les flux migratoires.

Au carrefour de ces trois aspects, nous retrouvons, entre autres, la notion de déchets. En effet, pour l'aspect social/sociétal, la production de déchets est inhérente aux tâches réalisées par les humains et une mauvaise gestion de ces déchets pourrait facilement devenir un problème de santé publique. Pour l'aspect environnemental, les déchets peuvent entraîner une dégradation, voire une contamination de l'environnement. Enfin, pour l'aspect économique, la collecte et le traitement des déchets peuvent être considérés comme un processus de production avec ses coûts et ses recettes. Un gain peut donc être généré si les déchets sont correctement valorisés (Lavee, 2013). Pour faire un meilleur usage et valoriser les déchets générés dans les procédés industriels ou ménagers de tous les jours, il existe plusieurs méthodologies issues des différentes fractions (Pires, 2011). Cependant, quelle que soit la méthode utilisée, il faut pouvoir identifier le producteur, ainsi que le circuit que les déchets doivent suivre.

L'objectif final de nos travaux est d'optimiser le pilotage du système de gestion des déchets et de l'intégrer dans la préservation de l'écosystème considéré et pas

seulement de disposer d'une approche orientée développement durable des activités (définition des achats responsables, du transport durable...) comme cela se pratique actuellement. L'idée ici est d'avoir une approche globale de l'écosystème dans un contexte de durabilité et pas uniquement de « simplement » inscrire le système de gestion des déchets dans un cadre de développement durable en agissant sur les leviers d'action considérés généralement (économique, sociétal et environnemental).

Pour arriver à l'identification de ces aspects, il faut modéliser au mieux le système industriel ainsi que toutes les parties prenantes et leurs interactions ce qui constitue l'objet du présent article. Nous avons choisi de proposer un modèle de type UML, car standardisé (Roques, 2008 ; Paniers, 2002) et suffisamment accessible (Roques, 2011) pour faciliter les échanges entreprise/recherche. Ce modèle permet de bien représenter les objets présents dans le système, les relations entre eux, ainsi que les opérations qui caractérisent chaque classe d'objets (Miles, 2006). Ce modèle est donc particulièrement intéressant dans notre cas d'étude. En effet, un grand nombre de personnes ou d'entités sont impliquées. Ces systèmes doivent donc être adaptés aux objectifs spécifiques de la communauté en intégrant les perspectives et les besoins des intervenants et du contexte (par exemple l'acceptation totale par les autorités locales et la sphère publique de la gestion des déchets, la participation des citoyens, la responsabilisation, la coopération, l'action collective, la communication et l'accessibilité des informations) (Mars, 2013). Un grand nombre d'éléments doit être détaillé avec des interactions multiples et diverses (Mars, 2013). Le modèle proposé permettra également de mettre en évidence tous les cycles d'économie circulaire (Yi, 2011) existants ainsi que les possibilités d'amélioration. La mise en évidence des cycles d'économie circulaire (cycles courts au vu d'une échelle de temps humaine) et ce, par une approche globale/systemique permettra d'intégrer tous les acteurs dont la Nature. En effet, les cycles d'économie circulaire sont directement corrélés à la zone territoriale considérée qui correspond à la zone d'activités du système de gestion des déchets. Il faut donc considérer le système de gestion des déchets et sa zone d'implantation qui peut être assimilée à un écosystème même si son fonctionnement en est imparfait.

Une fois le système de gestion des déchets ménagers modélisé, il faut parvenir à identifier les points forts et les points d'amélioration du système. La démarche retenue est basée sur la mesure de performances et sur la définition d'indicateurs corrélés ensuite au sein d'un tableau de bord qui sera utilisé pour le pilotage de notre système de valorisation des déchets ménagers. La principale fonction de l'indicateur est en effet de montrer les problèmes examinés d'une manière qui préserve le contenu de l'information de l'analyse. L'utilisation d'indicateurs est considérée comme une étape clé pour guider le processus de prise de décision, car il ne peut y avoir d'indicateurs sans politiques ni de politiques sans indicateurs (Scipioni, 2009). Une fois les indicateurs de performances industrielles et durables définis, un tableau de bord est proposé, qui permet à l'entreprise d'exprimer les objectifs et actions permettant de répondre à sa stratégie (Zurbrügg, 2012). Il permet d'administrer l'entreprise en allant au-delà du simple point de vue financier que les gestionnaires ont tendance à privilégier pour évaluer les progrès d'une société.

Nous proposons un tableau de bord qui s'intéresse autant aux questions humaines qu'à l'aspect environnemental, afin que les organisations puissent agir sur le long terme au meilleur de leurs intérêts. Notre tableau de bord devra permettre d'équilibrer la perspective financière avec les perspectives du client, du processus, et des employés (Zurbrügg, 2012) mais également de la « Nature », élément plus rarement considéré.

Dans la section 2, nous présentons les notions relatives à la gestion des déchets ainsi que le système industriel considéré. La section 3 présente le modèle proposé pour le système de gestion des déchets considéré ainsi que tous les cycles d'économie circulaire. Dans la section 4, le pilotage durable des déchets ménagers est étudié avec la définition d'indicateurs industriels. Ces indicateurs sont ensuite agrégés dans un tableau de bord afin de parvenir à un pilotage durable des déchets ménagers et des pistes d'amélioration sont proposées. Nous terminons par une conclusion et quelques perspectives.

2. Gestion des déchets ménagers

Avant de présenter le système réel à partir duquel nous avons travaillé et développé nos résultats, nous reprenons d'abord les différentes notions relatives à la gestion des déchets, avec une définition et une typologie des déchets, et au processus de gestion dans sa globalité avec mise en évidence des points clés sur lesquels agir.

2.1. Généralités

Généralement, quel que soit le type d'activités anthropiques menées, différentes « matières » sont générées. Parmi celles-ci, certaines le sont sans avoir atteint de valeur économique et, au contraire, représentent un coût. Dans ce cas, elles sont communément appelées : « déchets ». La génération de ces déchets est perçue comme l'un des problèmes environnementaux les plus graves dans le monde et leur élimination représente un coût considérable (15,7 milliards d'euros en France en 2011) (Ademe, 2014). 355 millions de tonnes de déchets ont été produits en France en 2010 (soit une augmentation de plus de 10 millions en deux ans) ce qui nous classe un peu au-dessous de la moyenne européenne. Parmi ces déchets, 55 millions de tonnes sont issues des ménages et du secteur tertiaire, et seuls 44 % environ sont recyclés, alors que les objectifs fixés en 2012 étaient de 75 % (Min. Envir., 2010). La quantité de déchets ne cesse d'augmenter et ce pour différentes raisons, dont la principale a trait à la croissance de la population, du niveau de vie et de modes de consommation non viables. S'ajoute à cela une mauvaise gestion des déchets qui aggrave encore la situation (Lavee, 2013) pour les humains, mais aussi pour les différentes espèces et écosystèmes. C'est pour cette raison qu'une gestion efficace des déchets contribue à la santé publique, à la durabilité environnementale et au développement économique, c'est un défi sociétal et urbain (Uyerra, 2013). Selon le type de déchets, des traitements différents doivent être mis en œuvre afin d'obtenir le plus grand bénéfice possible, et, généralement, les déchets sont différenciés selon leur composition (déchets organiques, inorganiques, mixtes, dangereux) et selon leur

origine (déchets ménagers, communaux, industriels, commerciaux et hospitaliers) (Mosler, 2006). Dans cet article, nous limitons notre étude aux déchets ménagers.

Depuis toujours, la principale idée retenue est de traiter les déchets comme une ressource à exploiter plutôt que comme un problème à éliminer. Une gestion appropriée préconise de poursuivre l'effort pour réduire les effets nocifs sur la santé humaine et l'environnement et pour récupérer ce qui est récupérable. Parmi toutes les solutions possibles, une démarche très efficace est de trier ceux-ci à la source (Mosler, 2006). Le tri à la source des déchets solides nécessite un système complexe qui comprend l'achat de matériels de capture supplémentaires, ainsi que des opérations de promotion pour mobiliser l'opinion publique. Cependant, il est important de souligner que les avantages de la séparation des déchets organiques à la source l'emportent sur les coûts environnementaux associés à ce processus (Lavee, 2013). Une fois les déchets triés, un traitement peut être mis en œuvre.

Pour le traitement des déchets, il existe plusieurs procédures possibles qui toutes se basent sur la philosophie du développement durable et également sur le concept d'économie circulaire (McDonough, 2011). L'économie circulaire est essentiellement une économie écologique (Bonet Fernandez, 2014), qui nécessite des activités économiques humaines en accord avec le principe des 3R (Ferroq, 2014) : Réduire, Réutiliser et Recycler (Ying, 2012). Ce concept renvoie à des stratégies de gestion des déchets qui cherchent à devenir plus respectueuses de l'environnement et à donner spécifiquement priorité à la réduction du volume de déchets générés (Li, 2011) :

- Réduire : mettre en œuvre des mesures pour réduire la production d'objets sensibles pouvant devenir des déchets.

- Réutiliser : développer des actions de réutilisation d'un produit particulier, afin de lui donner une seconde vie soit avec la même utilisation soit avec une autre, selon le cas.

- Recycler : transformer des matières ou déchets en nouveaux produits, en cherchant ainsi à éviter la désuétude des éléments potentiellement utiles et réduire la consommation de nouvelles matières premières et d'énergie. La mise en œuvre du recyclage permet entre autres de diminuer la pollution de l'air engendrée à partir de l'incinération et également la contamination de l'eau générée dans les décharges. Il s'agit de prendre les déchets de divers procédés et de les convertir en matériaux réutilisables pour d'autres activités.

Un cycle de vie pour les déchets doit donc être identifié ainsi que la circularité de ce cycle de vie relativement aux différents acteurs concernés. En plus des problématiques purement industrielles, il faut intégrer dans le modèle proposé, des données temporelles (effets des modifications anthropiques à plus ou moins long terme/résilience, durabilité...) et spatiales (localisation/concentration des productions, géographie du territoire/urbanisation/pénurie d'espaces, mutualisation des ressources, complémentarité des filières...). L'idée est d'avoir une vision globale de l'écosystème et de l'activité liée aux déchets. La difficulté est bien sur le fait d'intégrer ces dimensions spatiales et temporelles dans un même modèle sachant que les échelles/dimensions sont très différentes.

Il faut aussi, au-delà de la simple circularité, s'intéresser à la taille du cycle en lui-même. En effet, plus celui-ci est court plus il devrait être efficient, puisque réduisant les transports, manutentions, etc. La gestion des déchets comprend diverses étapes pour l'élimination de la matière. Les différents processus implémentés forment ainsi une chaîne où chaque maillon cherche à centrer ses efforts afin d'améliorer l'ensemble du processus (Yi, 2011). En fonction de la nature des déchets et de la zone géographique considérée, le processus peut continuer avec un traitement spécifique de façon à s'assurer que les déchets soient utilisés de manière optimale. Ce traitement peut consister à réduire leur risque, récupérer les matières pour le recyclage, produire de l'énergie et/ou réduire le volume pour avoir une disposition plus efficace (Pires, 2011). Cependant, notons que les méthodes de collecte et de traitement varient considérablement entre les différents pays et régions. Une fois les déchets collectés, l'étape de valorisation peut être mise en œuvre.

Il existe plusieurs techniques de valorisation des déchets et chacune dépend de l'objectif à atteindre. Comme nous l'avons vu, les déchets peuvent être envoyés aux stations d'incinération, vers des décharges de type enfouissement ou à l'air libre, vers des usines de recyclage ou des centres de traitement biologique-mécanique, soit sur ordure brute, soit sur ordure triée à la source, avec valorisation de type aérobie ou anaérobie. Chacune de ces méthodes présente un traitement et une valorisation des déchets tout à fait différents. Pour les deux premiers cas, les installations d'incinération et les décharges, ce sont des méthodes dont l'utilisation a diminué et qui ne représentent pas une utilisation très efficace des déchets. De plus, dans ces processus, un impact négatif sur l'environnement est généré (forte pollution par gaz à effet de serre, ainsi que contamination du sol et de l'eau) (Lavee, 2013).

Enfin, nous constatons dans les travaux menés actuellement le manque de considération des besoins réels des différents acteurs (Ghiani, 2014). De plus, ces travaux proposent soit des développements purement scientifiques et techniques, soit des études plutôt socio-économiques qui oublient d'inclure des techniques industrielles pour optimiser le système, mais rarement la conjonction des deux (Pires, 2011). Ce sont ces différents verrous que nous visons à solutionner à terme et, en particulier, le cas très intéressant des centres de traitement biomécanique, qui s'inscrit pleinement dans un contexte d'économie circulaire, ici à cycle très court, restant au niveau local. C'est la raison pour laquelle nous nous concentrons sur son étude dans cet article. Nos travaux s'appuient sur un système industriel existant, le Sydeme (Syndicat Mixte de Transport et de Traitement des Déchets de Moselle-Est).

2.2. Système industriel considéré

Le Sydeme est implanté dans l'est de la France, plus précisément en Moselle Est et regroupe 298 communes correspondant à un peu moins de 400 000 habitants (Sydeme, 2015). Le territoire géographique couvert par le Sydeme est donné en annexe 1. Ce syndicat a une activité répartie entre plusieurs sites. Pour assurer le transport, le stockage, le traitement et la valorisation des déchets, le Sydeme dispose de : un centre de tri des recyclables, 3 centres de tri multiflux, 3 centres de transfert, une plate-forme de compostage, 3 plateformes de broyage des déchets verts et une

plateforme de broyage du bois. Le tri multiflux est une particularité qui assure pour les différents ménages implantés sur une des communes concernées par le Sydeme d'avoir une collecte des déchets générés en un seul flux tout en assurant un tri à la source. En effet, les ménages doivent utiliser trois types de sacs offerts par le Sydeme : un sac vert pour les biodéchets, un sac orange pour les recyclables (papiers, cartons, plastiques, emballages en acier et en aluminium) et un sac bleu pour les résiduels (ordures ménagères). L'intérêt majeur de ce ramassage des déchets est qu'il facilite le tri effectué par les ménages, et permet également de réduire les risques d'erreurs, et que la collecte des différents types de déchets (sacs) se fait en une seule fois, le tri des différents sacs étant réalisé automatiquement en interne au Sydeme. De plus, le positionnement géographique du Sydeme est central par rapport aux usagers afin d'améliorer les résultats finaux globaux, comme la limitation des transports en amont et l'optimisation des possibilités de valorisation énergétique.

Les déchets sont donc ramassés depuis le producteur puis acheminés jusqu'aux centres de transfert. Les déchets sont ensuite envoyés vers les sites de tri, où ils sont triés par type de sac avant d'être redirigés soit dans le site Méthavalor pour les biodéchets, soit dans des usines de traitement des déchets. Le site Méthavalor est une usine de méthanisation avec production de biogaz obtenu à partir des déchets organiques récupérés. Le Sydeme collecte de nombreux autres types de déchets comme le verre, les DASRI (déchets d'activités de soins à risques infectieux), les D3E (déchets d'équipements électriques et électroniques), les déchets verts, les textiles, etc. Pour chacun de ces types, des collectes particulières sont mises en œuvre comme de la collecte en porte-à-porte, collecte par apport volontaire, etc. et non présentées dans ce papier.

D'un point de vue purement économique, le système existant permet de gagner actuellement environ 40 % sur le coût total moyen de gestion des déchets ménagers en Moselle-Est où il est implanté (Sydeme, 2015), et une optimisation formelle nous permettra d'améliorer encore ce résultat. De plus, du fait de la production et de l'utilisation pour le transport de collecte des déchets d'éco GNV (mélange de biogaz et de gaz naturel), une réduction des émissions de CO₂, de NOx et de particules est induite avec une réduction corrélative de coûts de traitement des maladies et morts associées. Ajoutons, au niveau sociétal, les créations d'emplois liées et les formations proposées pour le personnel recruté, entraînant une augmentation du niveau de vie global local. Il est donc, à notre avis, très important de parvenir à définir un moyen de dupliquer ce système ailleurs en France. Cette duplication dépend, en plus d'éléments purement technologiques et techniques, du comportement et des habitudes des ménages. Notre contribution finale sera aussi de mettre en évidence et d'optimiser les paramètres permettant d'avoir une approche un peu plus éco-exemplaire. Dans la zone d'application du système existant, les ménages ont en effet réduit de 57 % leur production de déchets (Sydeme, 2015). De plus, comme nous le mettrons en avant dans la suite de notre travail, le Sydeme a également de nombreuses autres activités avec des impacts directs au niveau social/sociétal avec la sensibilisation de la population au développement durable (manifestations, formations, etc.). Le Sydeme agit en termes de biodiversité et de

protection de la nature et de l'environnement en général (Sydeme, 2015) tout en assurant de limiter les coûts générés par la gestion des déchets.

Dans la section suivante, nous présentons le modèle proposé pour le système de traitement et valorisation des déchets ménagers considérés ainsi que tous les cycles d'économie circulaire possibles.

3. Modélisation dans un cadre d'économie circulaire

Force est de constater que malgré la mise en œuvre de politiques communes et/ou concertées et une littérature riche en études sur la gestion des déchets (Krüger, 2012), à notre connaissance, peu de travaux présentent une vision systémique et intégrée du problème de gestion des déchets solides urbains (Marshall, 2013). En effet, les travaux ne considèrent pas toujours tous les liens et interactions possibles avec les différents acteurs concernés, Nature incluse. Or, selon le niveau de vie de la zone géographique considérée, les besoins et aspirations des habitants, les actions à mettre en œuvre en termes de développement durable ne sont évidemment pas les mêmes (Beaurain, 2011) et (Redclift, 2009). D'un point de vue systémique, la gestion des déchets englobe : l'identification de la production, le choix des traitements à mettre en œuvre et les installations afférentes, la gestion des flux de déchets et leur transport ainsi que la création et l'ajustement d'interactions entre les différents acteurs (producteurs, collecteurs, repreneurs, Nature, etc.).

Notre objectif est de proposer un modèle permettant une approche systémique de la gestion des déchets afin de pouvoir identifier d'une part, les comportements téléologiques des différents acteurs et parties prenantes et, d'autre part, rendre compte des nombreux processus sociaux, spatiaux, démographiques, économiques, organisationnels et industriels qui interagissent. Pour y parvenir, nous proposons dans un premier temps de nous baser sur le concept du modèle UML. La structure de modélisation retenue est basée sur l'intégration des besoins des différentes parties prenantes de l'écosystème considéré, zone d'activités du Sydeme, dans une approche systémique et est donnée dans la figure 1. Cette figure permet de mettre en évidence l'importance de bien considérer tous les acteurs de l'écosystème considéré aussi bien les acteurs externes au Sydeme mais également les acteurs internes du Sydeme, leurs liens/interactions et comportements. En effet, la satisfaction d'un acteur peut impacter et, ce sur des échelles temporelle et spatiale différentes, le comportement d'autres acteurs. Citons comme exemple un des besoins du système considéré qui est la possibilité de pouvoir consommer et produire du biogaz. Ce besoin n'avait pas été considéré par l'État et la partie consommation pour un producteur n'avait donc pas été intégrée par les pouvoirs publics dans l'élaboration des réglementations sur ce sujet. Le Sydeme a donc réagi et agit (en collaboration avec d'autres acteurs extérieur à l'écosystème traité) de façon à faire modifier le texte de loi concerné.

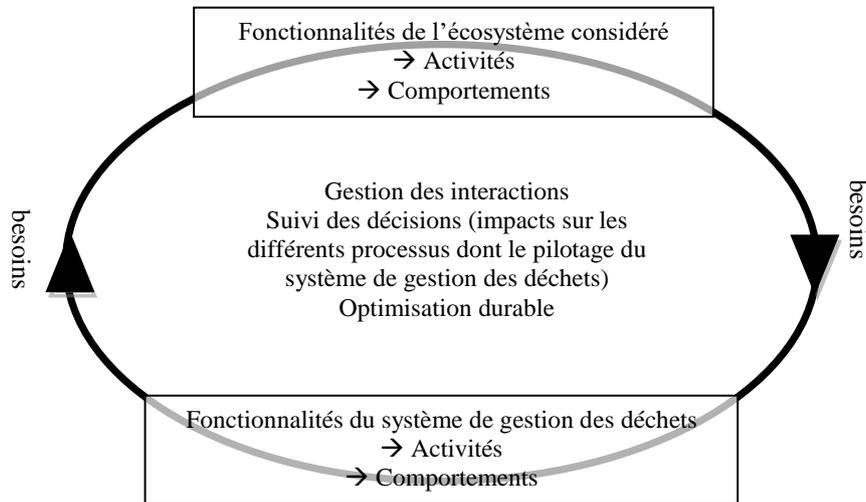


Figure 1. Architecture de modélisation

La figure 2, quant à elle, représente la vision systémique que nous proposons pour le système de gestion des déchets, vision incluant les trois piliers du développement durable. Dans cette figure, nous pouvons voir quelles sont les principales fonctions que doit assurer un système de gestion des déchets, à savoir : la caractérisation (identifier les types de déchets produits et leur quantité moyenne), la discrimination (trier les déchets en fonction de leur type), le choix du traitement à appliquer à chaque type de déchet (recyclage, méthanisation, incinération, enfouissement, etc.), gérer le transport des producteurs vers les centre de tri et de traitement, traiter les déchets en fonction des choix pris précédemment. Outre ces fonctions purement opérationnelles et directement liées au « métier » considéré, il faut aussi assurer une fonction de management qui consiste surtout à gérer les interactions entre les différents acteurs (population, transporteur, État, Nature, le système de gestion de déchet, etc.) afin d'assurer une coopération optimale, une qualité la plus constante possible des déchets collectés (qualité du tri) et de mettre en place les cycles d'économie circulaire les plus efficaces et courts possible ainsi que de créer de la valeur et des emplois sur la zone territoriale considérée. La sensibilisation au développement durable est également un objectif que le Sydeme s'est fixé (objectif lui permettant par ailleurs d'agir sur la qualité du tri entre autres).

Le diagramme UML (Rumbaugh, 2004) des classes pour le Sydeme est donné en Annexe 2. Notre modèle a la particularité de représenter toutes les parties prenantes, la « Nature » comprise. Nous allons montrer que le système physique étudié, le Sydeme, permet d'intégrer pleinement tous les aspects liés à la collecte, au traitement et à la valorisation des déchets ménagers dans un cadre d'économie circulaire.

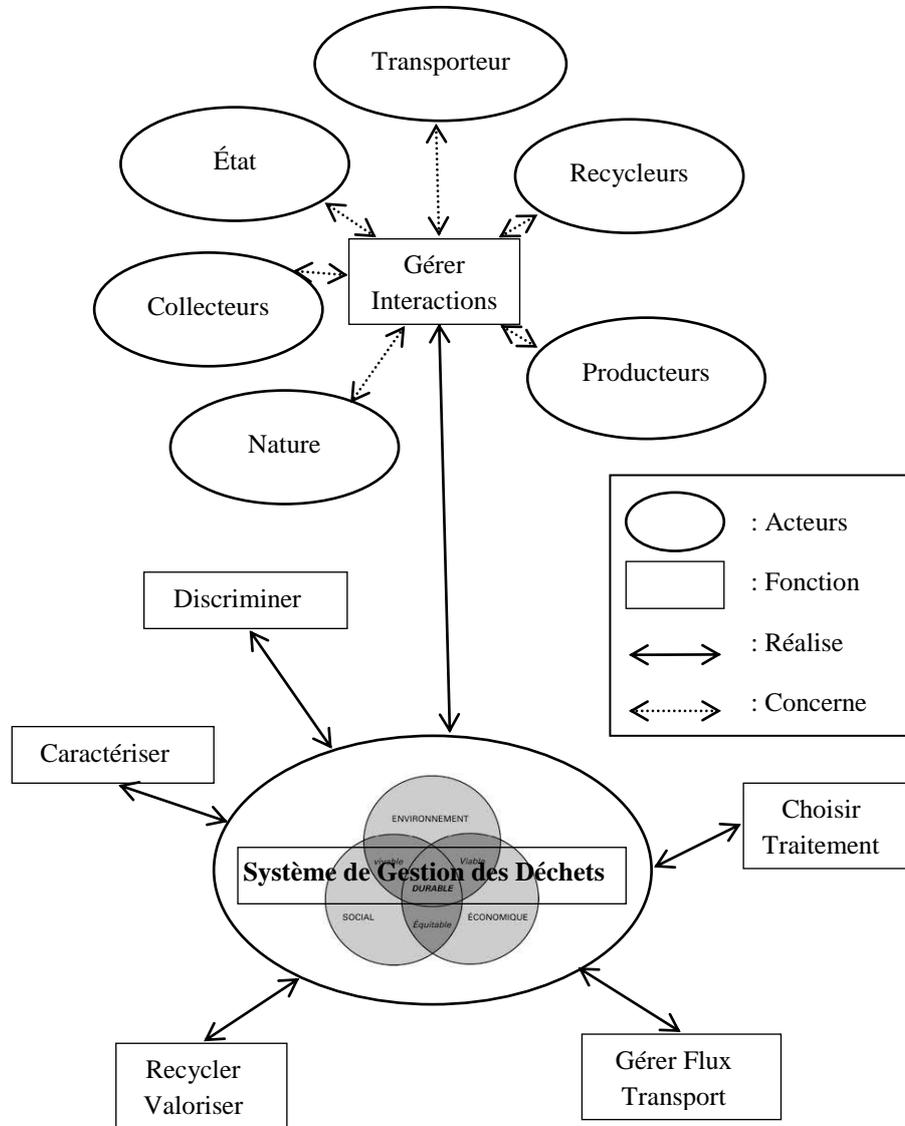


Figure 2. Fonctions et acteurs du système de gestion des déchets

Pour encourager un contexte d'économie circulaire, le Sydeme fabrique également des sacs pour le tri avec les déchets recyclables qui arrivent d'une de ces usines et ces sacs sont par la suite distribués gratuitement aux usagers du Sydeme. De plus, au niveau du site Méthavalor, des produits sont générés, tels des engrais, puis revendus à des clients. Par conséquent, nous sommes encore dans le cadre

d'une économie circulaire, car les déchets sont valorisés au maximum afin de réduire leurs impacts sur la nature et réutilisés dans l'agriculture afin d'obtenir l'alimentation qui a son tour redeviendra en partie un biodéchet. Un troisième cycle d'économie circulaire apparaît avec le biogaz produit par Méthavalor et revendu à GNVERT. Une partie de ce biogaz est utilisé par le Sydeme dans ses camions de collecte des déchets sous forme d'éco GNV (mélange de biogaz et de gaz naturel). On peut noter que ces trois cycles restent à un niveau local et ont donc un rendement quasi immédiat.

Le diagramme des classes est une première approche mais il faut également connaître les interactions dans le temps, c'est-à-dire le modèle d'interaction entre les entités. Dans ce tableau, les objets considérés sont distribués horizontalement, les messages sont représentés par ordre chronologique et des flèches indiquant le flux d'événements sont tirées du haut du diagramme vers le bas (voir Annexe 3). Dans la figure de l'Annexe 3, la séquence des interactions entre les entités est donnée. La première étape du processus est la demande de collecte des biodéchets. La deuxième étape correspond à la formation de l'utilisateur par rapport au tri. Ensuite, Méthavalor prépare la logistique pour la collecte et le tri des déchets (dans les sites de tri). Puis, les biodéchets sont ramenés au site Méthavalor afin de commencer le processus de méthanisation. Ce processus donne des produits qui sont vendus aux clients, certains pouvant être utilisés dans la nature pour produire de la nourriture. La nourriture peut être consommée par les usagers du site Méthavalor produisant ainsi des biodéchets et le processus redémarre encore une fois. Les diagrammes proposés ont été réalisés grâce à une collaboration étroite entre les auteurs, dont font partie les managers du Sydeme, afin d'assurer la vérification et la validité de ceux-ci.

Dans le processus de modélisation d'une activité ou d'une entreprise, une vaste connaissance des divers aspects tels que les différents acteurs impliqués, les interactions entre eux, les flux d'informations propres à ces relations, ainsi que le niveau de décision hiérarchique est nécessaire. En effet, seule cette connaissance, permet de générer une bonne modélisation qui permettra de trouver des améliorations au problème considéré.

Le principal avantage de notre modèle est sa capacité à faire face à des problèmes multidimensionnels et à gérer des informations de nature différente, incomplètes ou incertaines tout en intégrant pleinement la notion de développement durable. Cependant, la visualisation des différents liens/interactions entre les acteurs ne permet pas toujours de bien identifier les leviers d'amélioration. En effet, les résultats obtenus avec ces modèles doivent être mesurés et analysés pour déterminer s'ils sont positifs ou non au niveau de la performance. Il faut donc connaître les impacts que les processus développés et les acteurs ont sur eux-mêmes. Ceci peut se faire à l'aide d'indicateurs agrégés dans un tableau de bord présenté dans la section 4.

4. Indicateurs et tableau de bord

L'objectif principal des technologies et des politiques de gestion des déchets est de réduire les impacts néfastes sur l'environnement, en particulier ceux relatifs à la

consommation d'énergie et au changement climatique. Protéger la santé humaine et l'environnement en réduisant les répercussions négatives des déchets est également essentiel ainsi que de trouver des réutilisations bénéfiques pour ceux-ci. Afin de fournir aux gestionnaires d'un système de gestion des déchets une vue globale des performances industrielles et de durabilité de leur système de gestion des déchets, nous avons proposé quelques indicateurs ainsi qu'un tableau de bord pour le pilotage du système.

4.1. Indicateurs de durabilité

L'indicateur le plus commun pour mesurer l'efficacité environnementale des systèmes de traitement des déchets est le taux de recyclage du fait des réglementations sur les déchets présentant des objectifs quantitatifs pour le recyclage de certains déchets. Cependant, l'utilisation du taux de recyclage a été remise en question récemment et un passage à différentes méthodes d'évaluation du système a été suggéré (Greene, 2014). Il faut souligner que, même si le recyclage de nombreux matériaux est préférable, le taux de recyclage n'est pas une mesure appropriée de la viabilité du système de traitement des déchets et de ses avantages pour l'environnement. De plus, bien que le recyclage soit une partie importante des politiques durables, le recyclage n'est pas suffisant pour assurer qu'un système soit durable. En effet, le taux de recyclage ne reflète pas les différents impacts environnementaux dans la gestion des déchets non recyclables selon les technologies utilisées, telles que la mise en décharge ou l'incinération des déchets avec une dépense importante d'énergie (Greene, 2014).

La reconnaissance du fait que les taux de recyclage peuvent ne pas convenir pour les évaluations de prestations environnementales, a conduit à l'examen d'autres indicateurs possibles qui peuvent être utilisés. La définition d'indicateurs de durabilité efficaces est difficile, en raison de la complexité des phénomènes mis en jeu et de la difficulté à les intégrer en une seule mesure (Scipioni, 2009). En effet, diverses méthodes et processus peuvent être impliqués dans la gestion de la stratégie de l'organisation. De nombreux travaux actuels s'orientent sur des approches orientées produit/service avec une analyse du cycle de vie de celui-ci (Aissani, 2012) ou orientées écologie industrielle avec étude des intrants et extrants (bilan carbone et émission de gaz à effet de serre, rejets de polluants, empreinte écologique, sac à dos écologique, etc.). Ces différentes méthodes ont prouvé leur efficacité mais elles nécessitent de correctement identifier tous les paramètres et données du système étudié. De plus, il nous semble essentiel de mettre en évidence toutes les parties prenantes pour ne pas oublier la dimension sociale/sociétale (Benoit, 2010). C'est pourquoi, une approche plus systémique de la notion de durabilité nous semble intéressante dans la définition d'indicateurs pour la gestion des déchets (voir figure 1). Nous pouvons noter que, dans cette approche, la fonction de caractérisation permet d'analyser les quantités et qualité de déchets produits, mais aussi les producteurs eux-mêmes quant à leurs habitudes, résistances, particularismes, etc. tous liés à la notion de territorialité (culture, climat, géographie, etc.).

Dans ce sens, l'objectif est alors de définir un indicateur de pilotage durable du système de gestion des déchets afin d'assurer qu'il soit économiquement viable, écologiquement vivable et socialement équitable. Cet indicateur serait l'agrégation de différents indicateurs relatifs à chacun des piliers sachant que certains indicateurs sont liés et agissent différemment sur chaque pilier. Si l'aspect économique reste relativement simple à identifier (les différents coûts économiques de gestion industrielle des déchets ainsi que les coûts en lien avec chaque acteur identifié, etc.), les deux autres notions restent plus complexes à formuler. En effet, elles dépendent de nombreux éléments plus qualitatifs et/ou comportant de nombreux facteurs qui ne sont pas encore complètement identifiés (comme par exemple le bien-être des habitants, les impacts sur la nature à court, moyen et long termes, etc.).

Sans que cela soit une solution parfaite, il est possible de résoudre ce problème en agissant sur deux axes complémentaires. Premièrement, classifier les indicateurs en fonction des catégories concernées, et en particulier ici, les trois piliers du développement durable. Deuxièmement, agréger (de façon complète ou partielle) les indicateurs unitaires qui sont bien souvent trop nombreux, hétérogènes, voire contradictoires afin de proposer un tableau de bord simple et synthétique qui pourra servir de base à une prise de décision.

4.2. Tableau de bord

Le tableau de bord permet d'avoir une vision globale de l'entreprise. Il fait le lien entre les trois niveaux dans le système (stratégique, tactique et opérationnel). Ce lien est réalisable avec les interactions entre les 4 axes qui constituent un tableau de bord : finance, client, processus internes et apprentissage organisationnel (Mendes, 2012). Ainsi, un tableau de bord est généralement un outil plutôt axé sur les performances financières, organisationnelles et industrielles. L'aspect environnemental est plus rarement pris en compte, même s'il existe des indicateurs environnementaux regroupés au sein d'un tableau de bord environnemental, tels :

- les indicateurs de performance du management environnemental (IPM, par exemple le nombre d'heures de formation aux problématiques environnementales par employé),
- les indicateurs de performance environnementale (IPE, par exemple, la quantité de déchets par produit fabriqué), ou
- les indicateurs de condition environnementale (ICE, par exemple les kilos de CO₂ émis par heure de travail) (Zurbrügg, 2012).

Afin d'être un outil efficace pouvant soutenir le développement local, l'évaluation de la durabilité faite par le tableau de bord devrait être basée sur des indicateurs sélectionnés au niveau local, mais fournissant une vue d'ensemble de la situation (Scipioni, 2009).

La difficulté de construire des indicateurs en mesure de faire face à la tridimensionnalité du développement durable (environnemental, sociétal et économique), associe de nombreuses expériences de mesure au niveau local. Le

tableau de bord peut fonctionner en conjonction avec d'autres solutions techniques, en évitant l'utilisation de plusieurs méthodes distinctes, la dispersion des efforts et des ressources, fournissant ainsi une base de gestion de la performance globale et intégrée (Mendes, 2012).

Le tableau de bord que nous proposons possède explicitement les deux axes du développement durable en plus des axes clients et processus internes (l'aspect économique étant déjà existant dans un tableau de bord classique), à savoir : l'axe environnemental et l'axe social/sociétal. Cela permet aussi de bien mettre en évidence le contexte d'économie circulaire dans lequel le Sydeme se situe (tableau 1). Il est à noter que tous les indicateurs initiaux non agrégés du tableau de bord proposé ne sont pas détaillés dans cet article pour en simplifier la présentation. De plus, le choix de la pondération apportée à chacun des axes s'est fait sur la base du management actuellement suivi au sein du Sydeme et des besoins de ses managers.

Tableau 1. Tableau de bord proposé (simplifié)

Perspectives	Poids	Objectifs
Clients	20 %	Connaître ses clients
		Connaître le marché
Processus internes	30 %	Connaître le cycle de vie des déchets
		Analyse de la communication
		Évaluations des performances
		Optimiser les ressources
		Minimiser les risques
		Développer des services / projets
Économie	20 %	Mesurer la performance financière
		Optimiser l'amortissement
		Analyse de solvabilité
Société	15 %	Analyse de la fréquentation
		Développer des compétences
		Connaître ses collaborateurs
		Identifier l'impact local
		Étude de l'impact de la sensibilisation de la population sur les déchets
Environnement	15 %	Analyse de l'environnement

Ainsi, dans l'axe « clients », l'objectif, classique, est de bien connaître les clients, leurs besoins, leurs caractéristiques et leur satisfaction par rapport au produit(s)/service(s) offert(s). Pour l'axe « processus internes », il faut agir sur

l'optimisation du cycle de vie des déchets, la communication de l'entreprise avec l'extérieur mais également en interne. Bien sûr, il faut évaluer les performances industrielles, optimiser les ressources, identifier et minimiser les risques et développer de nouveaux produits/services/projets.

Les trois piliers du développement durable sont représentés dans les axes suivant : l'axe « économique », où l'objectif est de mesurer la performance financière, l'amortissement et la solvabilité. Le deuxième axe, l'axe « environnemental », permettra de faire une analyse des impacts sur l'environnement et la nature. Finalement, l'axe « social/sociétal » s'intéresse à tous les collaborateurs internes au système en considérant par exemple le taux d'absentéisme et le développement de leurs compétences. En parallèle, il faut également connaître l'impact au niveau local, comme par exemple, la localisation des fournisseurs et la sensibilisation de la population à la gestion des déchets.

Le tableau de bord proposé nous a permis de répondre à différents objectifs à savoir : répondre aux besoins actuels des managers du Sydeme, proposer un tableau de bord facilement adaptable si nécessaire aux besoins spécifiques d'entreprises/syndicats de gestion et de traitement des déchets ainsi qu'à l'activité socio-économique et aux critères environnementaux de la zone géographique d'implantation, permettre une ouverture et un paramétrage selon l'espace temporel considéré, considérer l'impact géographique et les comportements corrélés, et intégrer des indicateurs de haut niveau d'abstraction tout en conservant un mode de fonctionnement et une analyse simplifiée. Le mode d'agrégation permettant d'obtenir les indicateurs de haut niveau reste encore à modéliser mais l'instanciation dans notre tableau de bord est prévue.

Ce tableau de bord permet de pouvoir apprécier facilement l'état du système par rapport à ces différents aspects et donc de l'améliorer par la suite en identifiant les points faibles sur lesquels on peut définir de possibles actions à mener. Nous corrélons les résultats obtenus à une analyse SWOT (*Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats*) (Srivastava, 2005).

4.3. Analyse SWOT

En partant d'une analyse SWOT (Yuang, 2013), nous avons pu identifier quelques pistes d'amélioration pour le Sydeme :

- Forces : caractéristiques du Sydeme qui lui donnent un avantage sur sa concurrence.
- Faiblesses : caractéristiques qui placent le Sydeme dans une situation désavantageuse par rapport à la concurrence et aux clients.
- Opportunités : les éléments que le Sydeme pourrait exploiter à son avantage.
- Menaces : les éléments de l'environnement qui pourraient causer des problèmes pour le Sydeme.

Cette analyse SWOT simplifiée (certains résultats sont confidentiels et stratégiques et donc non détaillés dans cet article) est présentée dans le tableau 2.

Tableau 2. Analyse SWOT (simplifiée)

Forces
ressources spécifiques pour la collecte des ordures, service intégré pour la collecte des déchets et sacs de tri offerts, prix de vente faible comparativement à d'autres systèmes, traitement des déchets verts et valorisation de certains déchets, minimisation de l'utilisation de l'enfouissement et de l'incinération, campagnes auprès des ménages pour améliorer le tri et processus de sensibilisation, formation du personnel recruté, collaboration avec des sociétés municipales, privées et / ou mixtes, bonne couverture des circuits de collecte des déchets pour les petits producteurs, gestion des déchets multi-municipale, réduction de la consommation des ressources énergétiques non renouvelables et actions en faveur de la biodiversité...
Faiblesses
processus récent, contraintes budgétaires, législatives et culturelles...
Opportunités
assurance de l'existence d'un besoin de service de collecte, processus de collecte, tri et méthanisation pouvant être optimisé (coûts, organisation, vente, etc.), transfert à d'autres zones géographiques, collaboration avec des collectivités limitrophes (également implantées en Allemagne), autres activités connexes à développer afin d'augmenter l'économie circulaire du territoire considéré (forêts et agriculture), élaboration de protocoles de partenariats avec des universités et / ou écoles d'ingénieurs, capacité de développement humain (création d'emplois, etc.)...
Menaces
pressions politique, législative et autres, renouvellement des contrats, concurrence...

Le système considéré présente peu de faiblesses et de menaces et celles-ci peuvent être facilement résorbables. Par contre, beaucoup d'opportunités peuvent être exploitées selon différents scénarios en s'appuyant plus particulièrement sur les nombreuses forces. Le déploiement d'une stratégie pourra alors être mené suite aux résultats obtenus afin :

- d'explorer de nouvelles solutions pour les problèmes rencontrés,
- d'identifier les obstacles limitateurs des objectifs,
- de décider de l'orientation la plus efficace pour l'entreprise,
- de montrer les possibilités d'amélioration des processus.

En combinant les 4 différents axes de l'analyse SWOT, il est possible de définir des scénarios innovants et utiles pour l'entreprise. Plus particulièrement : combiner les forces et les opportunités permettra de définir les actions les plus prometteuses pour l'organisation. Alors que combiner faiblesses et menaces déterminera les blocages et limites à considérer. La combinaison des forces et faiblesses donnera les risques et la combinaison des faiblesses et opportunités donnera les défis potentiels à relever, ces deux notions seront indispensables pour tracer l'avenir du système ou du processus de gestion des déchets.

L'analyse SWOT proposée est directement corrélée et intégrée à notre tableau de bord via des indicateurs de productivité et d'efficacité et permet de mettre en évidence les perspectives positives d'évolution du système de gestion des déchets mais également d'anticiper sur certains facteurs dangereux. Une véritable analyse des incertitudes et opportunités devra être menée et ajoutée à nos travaux.

5. Conclusion

Dans cet article, nous avons proposé un modèle basé sur le langage UML pour représenter un système de collecte, traitement et valorisation des déchets ménagers. Le système étudié existant est le Sydeme, Syndicat mixte de transport et de traitement des déchets de Moselle-Est. Le modèle permet de mettre en évidence toutes les parties prenantes, leurs besoins/comportements et tous les liens existant entre elles dans une approche systémique. En effet, le système de gestion des déchets et sa zone d'activités peut être considéré comme un écosystème dont l'évolution dans le temps doit être intégrée. De plus, nous avons représenté comme partie prenante de notre système l'acteur « Nature » afin d'intégrer pleinement les notions liées essentiellement au pilier environnemental du développement durable.

Nous avons également proposé un tableau de bord qui a la particularité de représenter en plus des éléments classiques, les trois piliers du développement durable, à savoir : l'aspect économique (que l'on retrouve dans la mesure des performances d'une entreprise), l'aspect social/sociétal et l'aspect environnemental. Ce tableau de bord est défini à partir d'indicateurs de mesure de la performance industrielle et de la performance durable avec adaptation à notre cas d'indicateurs durables généraux (non détaillés dans cet article mais que l'agrégation des mesures permettra d'obtenir dans le futur). L'autre atout de notre tableau de bord est d'être facilement adaptable aux besoins des managers, quels que soient leurs objectifs, ainsi qu'aux spécificités géographiques d'implantation. En effet, les décisions qui seront prises à un instant donné pourront impacter, dans un futur à plus ou moins long terme, l'écosystème considéré avec des réactions des acteurs de l'écosystème externes au système de gestion des déchets impactant à leur tour les performances du système de gestion des déchets. Autrement dit, les décisions prises à un instant donné pourront tenir compte des impacts endogènes et exogènes vis-à-vis de l'écosystème considéré et, ce, en y intégrant les degrés de temporalité différents qu'un tel système doit gérer.

De plus, le tableau de bord proposé, associé à une analyse SWOT, permet de tenir compte des possibilités d'évolution du système de gestion des déchets au sein de l'écosystème considéré, que celles-ci soient positives ou négatives, ainsi que des incertitudes auxquelles le système de gestion des déchets et l'écosystème dans lequel il s'inscrit sont soumis.

Dans le futur, nous souhaiterions améliorer notre modèle en représentant les différentes décisions que doit prendre l'entreprise, que celles-ci soient à court, moyen ou long termes. En effet, l'aspect législatif et normatif est un élément important en développement durable et nous souhaiterions pouvoir faire un lien entre notre système et cet aspect législatif afin de pouvoir anticiper au maximum en couplant notre système de pilotage à la gestion des incertitudes. Une fois ce modèle totalement complet, nous pourrions alors l'utiliser afin d'optimiser le système existant et analyser de manière fine son intégration dans l'écosystème considéré pour en déduire les paramètres et adaptations nécessaires en vue d'une généralisation et d'une instanciation dans d'autres écosystèmes avec leur propres spécificités (territoriales, culturelles, spatiales, etc.)

Les objectifs futurs de nos travaux seront de mettre en avant (à partir de la validation du modèle et des résultats obtenus) la résilience de l'écosystème considéré relativement au système de gestion des déchets. Il faudra alors synchroniser les différentes activités des parties prenantes, via un modèle SysML.

Nous souhaiterions également associer les systèmes multi-agents à notre modèle et notre tableau de bord de façon à pouvoir simuler simplement notre système et ainsi l'améliorer en proposant un outil d'aide à la décision. *Reality is understood to be composed of complex open systems with emergent properties and transformational potential* (Byrne, 2005). *These characteristics are typical of complex, adaptive systems (CAS), of which eco-social systems are a part* (Marshall, 2013, p. 999). Il existe de nombreux systèmes éco-sociaux ; le cas du traitement de déchets en est un exemple. Nous pouvons l'affirmer, car il s'agit d'un système ouvert et complexe. L'utilisation des systèmes multi-agents serait une bonne alternative pour optimiser son pilotage.

Bibliographie

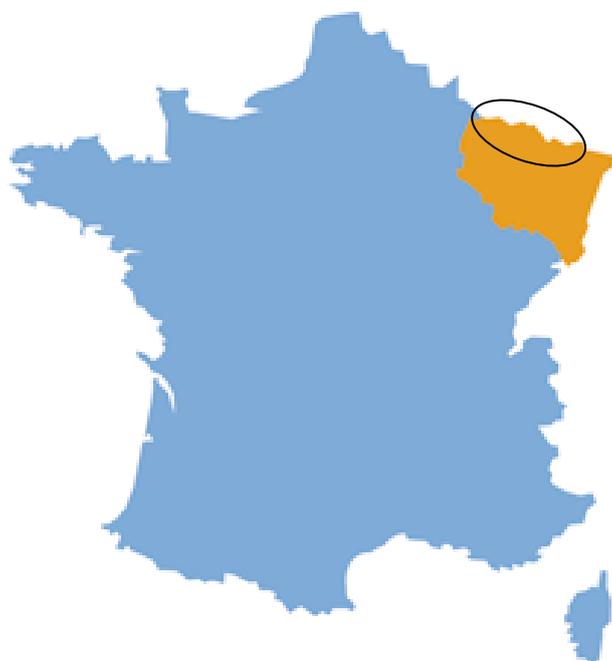
- ADEME (2014). Rapport de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie « Déchets Edition 2014 – Chiffres clés » <http://www2.ademe.fr/servlet/getDoc?sort=-1&cid=96&m=3&id=92266&ref=14227&nocache=yes&p1=111>
- Aissani L., Vaxelaire S., Papinot P-E., Védrine H., Mollaret M-E., Villeneuve J. (2012). *Méthodologie d'évaluation des impacts environnementaux des opérations de prétraitement des déchets*. Projet CleanWasT. 143 p., 29 ill.
- Beaurain C, Brullot S. (2011). L'écologie industrielle comme processus de développement territorial : Une lecture par la proximité. *Revue d'Économie Régionale et Urbaine*, vol 2, 313-340.

- Benoit C., Norris G.A., Valdivia S., Ciroth A., Moberg A., Bos U., Prakash S., Ugaya C., Beck T. (2010). The guidelines for social life cycle assessment of products: just in time!, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 15, n° 2, p. 156-163.
- Bonet Fernandez D. and Petit I. (2014). Influence de l'Économie Circulaire sur la performance et l'impact sociétal des entreprises. No 2014-133, Working Papers, Department of Research, Ipag Business School.
- Boutaud A. (2005). *Le développement durable : penser le changement ou changer le pansement ?* Thèse de Doctorat, École Supérieure des Mines de Saint-Étienne.
- Byrne D. (2005). Complexity, configurations and cases. *Theory, Culture & Society* 22 (5), 95-111.
- Fercoq A. (2014). *Contribution à la modélisation de l'intégration lean green appliquée au management des déchets pour une performance équilibrée (économique, environnementale, sociale)*. Thèse de Doctorat, ENSAM ParisTech, Paris, 2014.
- Ghiani G., Laganà D., Manni E., Musmanno R., Vigo D. (2014). Operations research in solid waste management: A survey of strategic and tactical issues. *Computers & Operations Research*, (44), 22-32.
- Greene K. L., Tonjes D. J. (2014). Quantitative assessments of municipal waste management systems: Using different indicators to compare and rank programs in New York State. *Waste Management*, 34, p. 825-836.
- Krüger S., Berger A., Krause U. (2012). Chemical-analytical investigation of fire products in intermediate storages of recycling materials. *Fire and Materials* 36(3), 165-175.
- Lavee D., Nardiya S., (2013). A cost evaluation method for transferring municipalities to solid waste source-separated system, *Waste Management*, 33(5), p. 1064-1072.
- Li X., Deng B., Ye H. (2011). The Research Based on the 3-R Principle of Agro-circular Economy Model-The Erhai Lake Basin as an Example. *Energy Procedia*, 5, p. 1399-1404.
- McDonough W. et Braungart M. (2011). *Cradle to cradle. Créer et recycler à l'infini*, 1^{re} version française publiée le 24 février 2011, collection Manifestô, éditions Alternatives.
- Marshall R. E., Farahbakhsh K. (2013). Systems approaches to integrated solid waste management in developing countries. *Waste Management*, 33(4), p. 988-1003.
- Mendes M., Santos A. C., Perna F., Ribau Teixeira M. (2012). The balanced scorecard as an integrated model applied to the Portuguese public service: a case study in the waste sector. *Journal of Cleaner Production*, 24, p. 20-29.
- Miles R., Hamilton K. (2006). *Learning UML 2.0*, O'Reilly Media; first edition (May 2).
- Min. Envir. (2010). Rapport du Ministère de l'Environnement français datant de 2010 <http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/CS385.pdf>
- MIT (1972). Document en anglais <http://www.donellameadows.org/wp-content/userfiles/Limits-to-Growth-digital-scan-version.pdf> vérifié en mai 2014.
- Mosler H. J., Drescher S., Zurbrügg C., Caballero Rodriguez T., Guzman Miranda O. (2006). Formulating waste management strategies based on waste management practices of households in Santiago de Cuba, Cuba. *Habitat International*, 30(4), p. 849-862.
- Paniers Tom (2002). *Introduction à UML*. Osman Eyrolles multimédia.

- Pires A., Martinho G., Chang N.-B. (2011). Solid waste management in European countries: A review of systems analysis techniques. *Journal of Environmental Management*, 92(4), p. 1033-1050.
- Rapport Bruntland (1987). Rapport publié suite à la conférence des Nations Unies à Stockholm en 1983. <http://www.worldbank.org/depweb/english/sd.html> site internet vérifié en mai 2014.
- Redclift M. (2009). Sustainable development (1987-2005) – an oxymoron comes of age. *Problemy Ekorożwoju*, 4(1), 33-50.
- Roques P. (2008). *SySML par l'exemple : Un langage de modélisation pour systèmes complexes*. Editions Eyrolles, Paris.
- Roques P. et Vallée F. (2011). *UML 2 en action : de l'analyse des besoins à la conception*, Editions Eyrolles, Paris.
- Rumbaugh James, Jacobson Ivar, and Booch Grady. 2004. *Unified Modeling Language Reference Manual*, the (2nd Edition). Pearson Higher Education.
- Scipioni A., Mazzi A., Mason M., Manzardo A. (2009). The Dashboard of Sustainability to measure the local urban sustainable development: The case study of Padua Municipality. *Ecological indicators*, 9, p. 364-380.
- Srivastava P.K., Kulshreshtha K., Mohanty C.S., Pushpangadan P. and Singh A. (2005). Stakeholder-based SWOT analysis for successful municipal waste management in Lucknow, India. *Waste management*, 25(5), p. 531-537.
- Sydeme (2015). Syndicat mixte de transport et de traitement des déchets de Moselle-Est <http://www.sydeme.fr/site/index.php>
- Uyarra E., Gee S. (2013). Transforming urban waste into sustainable material and energy usage: the case of Greater Manchester (UK), *Journal of Cleaner Production*, 50, p. 101-110.
- Yi M. Z., Guo H. H., Li H. (2011). An inexact reverse logistics model for municipal solid waste management systems. *Journal of Environmental Management*, 92(3), p. 522-530.
- Ying J., Li-Jun Z. (2012). Study on Green Supply Chain Management Based on Circular Economy. *Physics Procedia*, 25, p. 1682-1688.
- Yuan H. (2013). A SWOT analysis of successful construction waste management, *Journal of Cleaner Production*, 39, January 2013, p. 1-8.
- Zurbrügg C., Gfrerer M., Ashadi H., Brenner W., Küper D. (2012). Determinants of sustainability in solid waste management – The Gianyar Waste Recovery Project in Indonesia. *Waste Management*, 32(11), p. 2126-2133.

Article reçu le : 17/05/2015
Article accepté le : 20/11/2015

Annexe 1. Territoire couvert par le Sydeme



Annexe 3. Diagramme des interactions

