



**HAL**  
open science

# Conception d'un outil multicritères d'aide à la décision pour la valorisation des déchets industriels

Mickaël Buronfosse

► **To cite this version:**

Mickaël Buronfosse. Conception d'un outil multicritères d'aide à la décision pour la valorisation des déchets industriels. Gestion et management. Université de Technologie de Troyes, 2018. Français. NNT : 2018TROY0039 . tel-03596676

**HAL Id: tel-03596676**

**<https://theses.hal.science/tel-03596676v1>**

Submitted on 3 Mar 2022

**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.

Thèse  
de doctorat  
de l'UTT

**Mickaël BURONFOSSE**

**Conception d'un outil multicritères  
d'aide à la décision pour la  
valorisation des déchets industriels**

**Champ disciplinaire :**  
Sciences pour l'Ingénieur

2018TROY0039

Année 2018



---

---

# THESE

*pour l'obtention du grade de*

## DOCTEUR

de l'UNIVERSITE DE TECHNOLOGIE DE TROYES

en SCIENCES POUR L'INGENIEUR

**Spécialité : SYSTEMES SOCIOTECHNIQUES**

*présentée et soutenue par*

**Mickaël BURONFOSSE**

*le 21 novembre 2018*

---

---

**Conception d'un outil multicritères d'aide à la décision  
pour la valorisation des déchets industriels**

---

---

## JURY

M. D. LEVACHER	PROFESSEUR DES UNIVERSITES EMERITE	Président
M. B. CHRISTOPHE	PROFESSEUR DES UNIVERSITES EMERITE	Rapporteur
M. D. FROELICH	PROFESSEUR DES UNIVERSITES	Rapporteur
Mme B. COUFFIGNAL	DIRECTRICE DE L'ASSOCIATION RECORD	Examinatrice
M. Y. OUAZENE	MAITRE DE CONFERENCES	Examinateur
Mme N. TROUSSIER	PROFESSEURE DES UNIVERSITES	Examinatrice
M. N. ANTHEAUME	PROFESSEUR DES UNIVERSITES	Directeur de thèse
M. Y. BOUZIDI	PROFESSEUR ASSOCIE	Directeur de thèse

## Personnalités invitées

M. E. AUTRET	COORDINATEUR POLE CONCEPTION - ADEME
Mme S. LEANG	INGENIEURE ACHATS D'ENERGIE - ÉS ÉNERGIES STRASBOURG
M. F. THÉRY	EXPERT MANAGEMENT DURABLE DES DECHETS INDUSTRIELS - EDF

## RESUME ET ABSTRACT

---

Pour orienter un flux de déchets et faire un choix d'installation de gestion, les décideurs opérationnels doivent intégrer les volets économique, environnemental, territorial, technique et réglementaire. Ces aspects sont rarement traités ensemble et il est difficile de choisir entre différentes installations de valorisation, en se basant sur une analyse complète et élaborée.

Ce travail de thèse consiste en l'élaboration d'un outil comparant, via 23 critères et 42 avis d'experts, des installations de gestion de déchets sur ces 5 dimensions. Pour construire et pondérer les critères entre eux, nous avons adapté une méthode multicritères qui permet, via les avis d'experts, l'agrégation de critères qualitatifs et quantitatifs pour effectuer la comparaison des installations de valorisation.

Plusieurs installations de gestion ont été comparées à travers différents cas d'études sur les déchets amiantés, le bois, les sédiments de barrages hydro-électriques et les gravats issus de la déconstruction. Ces différentes études montrent le large spectre d'applications de l'outil.

Les installations comparées ont souvent des performances variables selon les dimensions et l'outil donne la possibilité aux décideurs opérationnels de choisir une installation en retenant le meilleur compromis entre les cinq aspects étudiés. En effet, selon leur perception du contexte et leur sensibilité, les gestionnaires de déchets peuvent prendre une décision et disposent d'une base argumentaire permettant la discussion avec les différents services internes et externes concernés par la gestion des déchets.

**Mots-clés :** Déchets -- Gestion intégrée, Économie circulaire, Décision multicritère, Déchets industriels

---

In order to select where a waste stream should go and to choose an appropriate management facility, operational decision makers must integrate economic, environmental, territorial, technical and regulatory aspects. These are seldom dealt with together and it's difficult to choose between different facilities, based on a comprehensive and elaborate analysis.

This thesis consists in the design of a tool in order to compare waste management facilities, based on various criteria which belong to the 5 previous aspects. To build and weigh the set of criteria, we propose to adapt and use a multi-criteria-decision-making method. It allows, via a wide panel of expert opinions (from industry, academia and environmental agencies), the aggregation of qualitative and quantitative criteria to compare waste management solutions.

Many facilities were compared, based on case studies: asbestos waste, wood waste, sediments from hydroelectric dams and recycled concrete from deconstruction. These studies demonstrate the wide application of the tool.

The management facilities which are compared have different levels of performance, which vary according to the dimensions studied. This gives the operational decision makers the possibility to choose the best compromise between the 5 aspects taken into consideration. Indeed, based on their perception of the context and on their own sensitivity, waste managers can make a decision and have a set of informed guidelines which enable a discussion with the various internal and external parties concerned by waste management.

**Keywords :** Integrated solid waste management, Circular economy, Multiple criteria decision making, Factory and trade waste





## REMERCIEMENTS

---

Je tiens tout d'abord à remercier mes encadrants industriels, *Sokha* et *François*, pour leurs conseils, leurs idées, leurs remarques et leurs multiples relectures. Pendant ces trois années, vous m'avez soutenu, orienté, aidé, épaulé et motivé comme des directeurs de thèse ; vous méritez amplement une habilitation à diriger des travaux de thèse. J'ai pris énormément de plaisir à travailler avec vous. Je ne retiens que des bons moments à vos côtés même lorsqu'ils étaient parfois douloureux (squash par exemple). *Gratias maximas ! François*, je n'oublierai jamais nos échanges, presque toujours sérieux, que ce soit au bureau ou chez toi (roi du barbecue !).

Je remercie également *Nicolas* et *Youcef* d'avoir cru en moi et de m'avoir donné l'opportunité de mener à bien cette thèse. *Youcef*, je te remercie pour ton aide, tes commentaires et remarques durant ces trois années de thèse qui ont été, pour moi, très formatrices. *Nicolas*, merci pour l'orientation que tu as donnée aux travaux, pour les invitations aux séminaires scientifiques que tu as organisés, pour tes conseils, ton écoute et pour ta disponibilité chaque fois que j'en ai eu besoin. Je souhaite aussi remercier *Bernard CHRISTOPHE* et *Daniel FROELICH* d'avoir accepté de rapporter mes travaux ainsi que *Bénédicte COUFFIGNAL*, *Daniel LEVACHER*, *Erwan AUTRET*, *Nadège TROUSSIER*, *Yassine OUAZENE* et *Marie-Laure RABOT-QUERCY* de les avoir examinés.

Je souhaite aussi remercier l'ensemble des personnes ayant travaillé dans le révolu groupe E22 — Gestion de l'environnement et expertise déchets — et plus largement les personnes que j'ai côtoyées à la R&D. *Anne-Marie*, merci de m'avoir hébergé dans ton bureau pendant 3 ans, j'en garde un excellent souvenir. J'ai beaucoup appris grâce à toi, notamment sur l'existence de BD Astérix et d'autres histoires Disney en plus du Roi Lion. *Gilles*, je n'ai pas eu la chance de te connaître avant, mais j'ai apprécié de travailler, échanger et « m'amuser » avec toi. Merci à *Baptiste*, *Violaine*, *Hervé*, *Coryse*, *Estelle*, *Denis*, *Agathe*, *Catherine*, *Arnaud*, *Sophie*, *Raphaël*, *Anne* et *Corinne* d'avoir contribué à rendre l'ambiance du groupe agréable et professionnelle. Je n'oublie pas les doctorants, à présent docteurs, avec qui j'ai partagé de bons fous-rires à la R&D : *Anne-Sophie*, *Gaëtan* et *Antoine*. Je ne peux également pas oublier *Pauline* mais aussi les stagiaires et alternants *Maxime*, *Nada* et *Fanny* qui ont travaillé et alimenté mes travaux.

Toujours au sein d'EDF, je tiens tout particulièrement à remercier, *Sandrine*, *Vincent*, *Françoise* et *Yann* de m'avoir fait confiance, soutenu et fourni les moyens de mener mes travaux dans les meilleures conditions. Un grand merci à *Alain* pour nos discussions matinales (et pour les nougats), à *David* pour nos échanges très sérieux (lol) et à *Grégory* pour la résolution et la genèse de nouveaux problèmes informatiques.

Je tiens également à remercier l'ensemble des personnes ayant participé de près ou de loin à mes travaux, tant au niveau des salariés d'EDF, qu'au niveau des experts avec qui j'ai eu l'opportunité d'interagir ; vous avez largement contribué à mes travaux de recherche et à la qualité des résultats obtenus.

Plus personnel, je pense fortement à *mes parents* qui m'ont donné la chance de faire de longues études et qui m'ont apporté leur soutien durant toutes ces années : je les remercie très affectueusement. Enfin, un immense merci à toi, *Konnie*, pour ton soutien quotidien, pour tes relectures et ta joie de vivre qui m'ont permis d'avancer et de mener à bien ce projet ! Tu as été une source d'inspiration et de motivation.

J'ai également une pensée pour *Chérone*, *Thibault* et leur adorable *Amariah* qui m'ont offert la possibilité de m'évader quelques week-ends.

Je termine en dédiant cette thèse à mes *grands-parents*, mes *parents*, mon *frère* et à toi, *Konnie* puisque sans vous tous, je n'en serais pas là aujourd'hui. MERCI !!!



# SOMMAIRE

---

<b>RÉSUMÉ ET ABSTRACT</b>	<b>i</b>
<b>REMERCIEMENTS</b>	<b>ii</b>
<b>SOMMAIRE</b>	<b>v</b>
<b>TABLE DES FIGURES</b>	<b>vi</b>
<b>TABLE DES TABLEAUX</b>	<b>ix</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE</b>	<b>15</b>
<b>CHAPITRE 1 : CONTEXTE ET ENJEUX</b>	<b>19</b>
1.1. Contexte lié à la gestion des chets .....	23
1.2. Contexte et enjeux du groupe EDF .....	30
1.3. La revue de littérature .....	33
1.4. Positionnement du sujet .....	36
<b>CHAPITRE 2 : ÉTAT DE L'ART</b>	<b>41</b>
2.1. Les différents modèles .....	44
2.2. Les modèles d'évaluation des systèmes .....	47
2.3. Les méthodes d'analyse multicritères d'aide à la décision.....	57
2.4. Les critères étudiés dans la littérature liés à la gestion des déchets.....	67
2.5. Discussion .....	73
<b>CHAPITRE 3 : METHODOLOGIE</b>	<b>75</b>
3.1. Le vocabulaire et les définitions.....	79
3.2. Description générale de la méthodologie AHP .....	81
3.3. Application de la méthode pour l'obtention du poids des critères.....	82
3.4. Les différents types d'échelles de critères .....	85
3.5. Les experts .....	90
3.6. L'agrégation .....	94
3.7. Calcul des notes finales pour chacune des dimensions .....	97
3.8. Analyse des résultats .....	97
3.9. Discussion .....	100
<b>CHAPITRE 4 : LES CRITERES</b>	<b>101</b>
4.1. Les critères de la dimension Réglementaire .....	104
4.2. Les critères de la dimension Économique .....	108
4.3. Les critères de la dimension Technique .....	111
4.4. Les critères de la dimension Territoriale .....	115
4.5. Les critères de la dimension Environnementale .....	122
4.6. Discussion .....	126
<b>CHAPITRE 5 : TEST DU MODELE SUR LE CAS DES DÉCHETS AMIANTES</b>	<b>129</b>
5.1. Les déchets amiantés.....	132
5.2. Étude de cas : comparaison des deux installations .....	140
5.3. Discussion .....	155
<b>CHAPITRE 6 : LES ETUDES DE CAS</b>	<b>159</b>
6.1. Les déchets de bois.....	162
6.2. Les sédiments .....	175
6.3. les granulats de la déconstruction.....	188
6.4. Discussion .....	200
<b>CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES</b>	<b>203</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>209</b>
<b>ANNEXES</b>	<b>220</b>

## TABLE DES FIGURES

---

Figure 1 : La démarche Connaitre Localiser Evaluer (CLE).....	15
Figure 2 : Structure schématique du document .....	17
Figure 3 : L'économie circulaire selon l'ADEME .....	21
Figure 4 : L'organisation du chapitre 1 .....	22
Figure 5 : Quantité de déchets générés en Europe et en France, de 2004 à 2014 d'après Eurostat.....	24
Figure 6 : Déchets produits par les activités économiques et les ménages en 2012, UE-28 .....	24
Figure 7 : Mode de traitement des déchets par pays d'après Eurostat.....	25
Figure 8 : La production de déchets en France en 2012 d'après l'ADEME.....	25
Figure 9 : Représentation schématique de l'articulation entre réglementation européenne et réglementation française.....	26
Figure 10 : L'économie circulaire selon l'ADEME .....	29
Figure 11 : Part des moyens de production de l'électricité en France en 2015 .....	30
Figure 12 : Organisation du chapitre 2 .....	35
Figure 13 : Les 4 groupes de critères d'un système de management des déchets d'après Coelho, Lange et Coelho .....	35
Figure 14 : Les aspects et les combinaisons étudiées dans l'évaluation de la gestion des déchets par des méthodes multicritères d'après Coelho, Lange et Coelho .....	36
Figure 15 : Comparaison des flux monétaires et physiques entre un bien classique et un déchet.....	37
Figure 16 : Les 5 dimensions étudiées pour les travaux de recherche.....	38
Figure 17 : La démarche générale des travaux de thèse .....	40
Figure 18 : Les deux familles de modèles, adapté d'après les travaux Chang et al .....	44
Figure 19 : La diversité des modèles d'analyse environnementale d'après les travaux de Chang et al et d'Angelakoglou et Gaidajis .....	45
Figure 20 : Un système déchet complexe et ouvert.....	46
Figure 21 : Cadre de l'ACV .....	48
Figure 22 : Frontières et étapes prises en compte dans une ACV déchet.....	49
Figure 23 : Représentation graphique de la démarche MFA d'après Schmidt.....	52
Figure 24 : Les étapes du LCC d'après Kawauchi et Rausand.....	54
Figure 25 : Les différents modèles multicritères (non exhaustif).....	57
Figure 26 : Exemple d'un résultat avec ELECTRE III.....	59
Figure 27 : Procédure de choix d'une méthode ELECTRE d'après Maystre et al.....	62
Figure 28 : Les différentes méthodes et aiguillages .....	65
Figure 29 : Méthodologie « recherche – action » pour la construction du modèle.....	77
Figure 30 : Exemple de modèle hiérarchique AHP .....	81
Figure 31 : Structure hiérarchique de la dimension réglementaire .....	83
Figure 32 : Les échelles de la dimension réglementaire.....	85
Figure 33 : La typologie des experts mobilisés .....	91
Figure 34 : L'interaction des différents experts dans la construction du modèle .....	92
Figure 35 : Structure du questionnaire pour collecter les avis d'experts.....	92

Figure 36 : L'agrégation des jugements individuels.....	95
Figure 37 : L'agrégation des poids relatifs individuels .....	95
Figure 38 : Modèle d'outil.....	103
Figure 39 : Les quatre critères de la partie réglementaire .....	104
Figure 40 : Extrait de la « Liste Déchets Tableau Codes D et R » .....	107
Figure 41 : Les trois critères de la partie économique.....	109
Figure 42 : Les six critères de la partie technique .....	111
Figure 43 : Représentation graphique de la fluctuation temporaire.....	115
Figure 44 : Les cinq critères de la partie territoriale.....	116
Figure 45 : Les cinq critères de la dimension environnementale .....	122
Figure 46 : Les catégories d'amiantes consommées dans la Communauté européenne en 1973 .....	131
Figure 47 : La répartition des tonnages de produits amiantés consommés en France, en 1973 .....	132
Figure 48 : L'élimination des déchets amiantés .....	135
Figure 49 : Le procédé de vitrification au plasma .....	136
Figure 50 : La couverture des déchets amiantés en alvéole.....	138
Figure 51 : Le type de déchets amiantés produit par EDF en 2015.....	139
Figure 52 : La répartition des déchets amiantés dans les filières.....	139
Figure 53 : Les sites EDF envoyant leurs déchets amiantés chez INERTAM .....	140
Figure 54 : Critères de la dimension réglementaire.....	141
Figure 55 : La synthèse des résultats des analyses de sensibilité sur la dimension réglementaire .....	144
Figure 56 : Les critères de la dimension économique .....	144
Figure 57 : La synthèse des résultats et analyses de sensibilité sur la dimension économique.....	147
Figure 58 : Les critères de la dimension territoriale .....	148
Figure 59 : La synthèse des résultats sur la dimension territoriale.....	150
Figure 60 : Les critères de la dimension environnementale .....	150
Figure 61 : Les critères techniques .....	152
Figure 62 : La synthèse des résultats et analyses de sensibilité sur la dimension technique.....	155
Figure 63 : Représentation graphique des poids des critères de la dimension économique .....	156
Figure 64 : Les différentes catégories de critères .....	157
Figure 65 : Les 2 types de fonctionnements des critères .....	158
Figure 66 : Origine des déchets de bois en 2012, en France .....	162
Figure 67 : Évolution des quantités (tonnes) de bois produits par EDF de 2010 à 2016 .....	163
Figure 68 : Destination des déchets de bois en France, pour l'industrie et chez EDF pour l'année 2012 ....	164
Figure 69 : Panneau de particules (UIPP) .....	166
Figure 70 : Schéma de principe général d'une chaufferie bois (OFME).....	167
Figure 71 : Filières retenues et non retenues pour la valorisation des déchets de bois.....	168
Figure 72 : Lit de la Durance.....	169
Figure 73 : Carte des installations retenues pour la valorisation des bois d'essartement.....	170
Figure 74 : Résultats de la comparaison des installations sur les 5 dimensions .....	171
Figure 75 : Résultats de la comparaison des installations sur la dimension économique.....	172

Figure 76 : Analyse de sensibilité des résultats de la dimension économique .....	172
Figure 77 : Résultats de la comparaison des installations sur la dimension réglementaire .....	173
Figure 78 : Résultats de la comparaison des installations sur les dimensions environnementale (gauche) et technique (droite).....	173
Figure 79 : Résultats de la comparaison des installations sur la dimension territoriale .....	174
Figure 80 : Fonctionnement d'une centrale à béton .....	177
Figure 81 : Procédé de fabrication de la terre cuite .....	177
Figure 82 : Photographie du développement de ray-grass à partir de sédiments, travaux de Geatan Fourvel .....	178
Figure 83 : Schéma de la structure d'une route .....	179
Figure 84 : Comblement de carrière près de Nantes (44 000) .....	180
Figure 85 : Photographie du Slufter près de Rotterdam .....	181
Figure 86 : Filières retenues et non retenues pour la valorisation des sédiments .....	182
Figure 87 : Carte des installations retenues pour la gestion à terre des sédiments .....	183
Figure 88 : Résultats de la comparaison des installations sur les 5 dimensions .....	184
Figure 89 : Résultats de la comparaison des installations sur la dimension réglementaire .....	185
Figure 90 : Résultats de la comparaison des installations sur la dimension économique.....	185
Figure 91 : Résultats de la comparaison des installations sur la dimension technique.....	186
Figure 92 : Résultats de la comparaison des installations sur la dimension environnementale .....	187
Figure 93 : Résultats de la comparaison des installations sur la dimension territoriale .....	188
Figure 94 : Consommation des granulats en 2008 et 2014 en France .....	190
Figure 95 : Utilisation des granulats en 2016 en France .....	190
Figure 96 : Filières retenues pour la valorisation des granulats issus de la déconstruction.....	193
Figure 97 : Carte des installations à proximité du CPT de Vitry-sur-Seine .....	194
Figure 98 : Résultats de la comparaison des installations sur les 5 dimensions (normalisées) .....	195
Figure 99 : Étude de cas granulats — réglementaire.....	196
Figure 100 : Étude de cas granulats - économique .....	196
Figure 101 : Étude de cas granulats — économique — variante.....	197
Figure 102 : Étude de cas granulats – économique .....	197
Figure 103 : Étude de cas granulats – environnement.....	198
Figure 104 : Étude de cas granulats – territoire.....	199
Figure 105 : Schéma conceptuel du territoire (extrait des installations) .....	199
Figure 106 : Interface utilisateur de l'outil informatique .....	201

## TABLE DES TABLEAUX

---

Tableau 1 : Volume de déchets industriels conventionnels produits par EDF .....	31
Tableau 2 : Taux de valorisation des déchets .....	31
Tableau 3 : Taux de valorisation de la liste verte .....	31
Tableau 4 : Objectif national de valorisation de la liste verte .....	32
Tableau 5 : Nombre de publications portant sur les déchets par base de données scientifiques. ....	33
Tableau 6 : Les objectifs des études liées à la gestion des déchets d'après Astrid Allesch et Brunner.....	34
Tableau 7 : Les systèmes étudiés par rapport à la hiérarchie de gestion des déchets européenne d'après Astrid Allesch et Brunner.....	34
Tableau 8 : Les flux de déchets examinés dans les études scientifiques d'après Allesch et Brunner. ....	34
Tableau 9 : Les outils d'évaluation des systèmes d'après Chang et al.....	44
Tableau 10 : Les modèles d'ingénierie des systèmes d'après Chang et al, appliqués aux déchets .....	46
Tableau 11 : Modèles, méthodes et outils examinés par la littérature scientifique pour les analyses environnementales (et dans le cadre d'une gestion de la gestion des déchets).....	48
Tableau 12 : Modèles de type cycle de vies spécialisées dans l'étude des déchets.....	50
Tableau 13 : Les principales méthodes d'analyse sociétale et économique .....	53
Tableau 14 : Les deux catégories d'études dans les démarches de combinaison LCC et LCA .....	54
Tableau 15 : Objet d'études lors d'une démarche CBA — Adapté d'après Allesch et Brunner .....	55
Tableau 16 : Comparaison entre les méthodes MADM et MODM.....	57
Tableau 17 : Les principales caractéristiques de quelques méthodes multicritères (extrait).....	59
Tableau 18 : Analyse des problématiques des méthodes multicritères d'après les travaux de Bernard ROY	60
Tableau 19 : La méthode Inputs/outputs d'après Guitouni, Martel et Vincke .....	61
Tableau 20 : Cahier des charges de l'outil envisagé.....	62
Tableau 21 : Exemple de comparaison par paire.....	64
Tableau 22 : Exemple de matrice de performance .....	64
Tableau 23 : Échelle sémantique d'AHP.....	64
Tableau 24 : Synthèse, non exhaustive, des caractéristiques des méthodes multicritères d'aide à la décision	66
Tableau 25 : Les critères environnementaux étudiés dans les ACV déchets.....	67
Tableau 26 : Les critères économiques identifiés.....	69
Tableau 27 : Extrait des critères territoriaux d'ordre social .....	69
Tableau 28 : Les critères territoriaux d'ordre technique .....	70
Tableau 29 : Extrait des critères territoriaux d'ordre géologique ou topographique.....	71
Tableau 30 : Extrait des critères techniques .....	71
Tableau 31 : Les critères réglementaires identifiés dans la littérature.....	72
Tableau 32 : Autres sources de critères identifiés .....	72
Tableau 33 : Les 5 familles de critères .....	73
Tableau 34 : Terminologie .....	79
Tableau 35 : Échelle de Saaty de la méthode AHP .....	82
Tableau 36 : Critères de la dimension réglementaire (exemple pour décrire le fonctionnement de la méthode) .....	83



Tableau 37 : Matrice de comparaison.....	83
Tableau 38 : Exemple normalisation de la matrice de comparaison et poids des critères.....	84
Tableau 39 : Exemple des poids des critères de la dimension réglementaire.....	84
Tableau 40 : Les 5 familles de critères.....	86
Tableau 41 : Les différents types d'échelles de critères.....	87
Tableau 42 : Exemple d'une échelle nominale, ici l'échelle du critère R1 — respect de la hiérarchie de gestion des déchets.....	87
Tableau 43 : Exemple d'une échelle ordinale.....	87
Tableau 44 : Exemple d'une échelle ordinale pseudo-quantitative.....	88
Tableau 45 : Exemple d'une échelle ordinale, ici l'échelle du critère T1 — Pérennité.....	88
Tableau 46 : Exemple d'une échelle de proportionnalité.....	88
Tableau 47 : R1 — respect de la hiérarchie de gestion des déchets.....	88
Tableau 48 : Exemple d'une échelle ordinale, ici l'échelle du critère T1 — Pérennité.....	89
Tableau 49 : Exemple d'une échelle de proportionnalité.....	89
Tableau 50 : Sens de lecture des échelles : cas 1 « plus est mieux ».....	89
Tableau 51 : Sens de lecture des échelles : cas 2 « moins est mieux ».....	89
Tableau 52 : Les critères de la deuxième catégorie.....	90
Tableau 53 : Les experts de construction référents par dimension.....	91
Tableau 54 : Les différentes expertises.....	92
Tableau 55 : Questionnaires et annexes.....	93
Tableau 56 : Le nombre d'experts.....	93
Tableau 57 : Méthode d'agrégation des avis d'experts lors d'un problème de décision de groupe avec AHP.....	94
Tableau 58 : Les différentes possibilités d'agrégation testées.....	96
Tableau 59 : Représentation des résultats selon les logiciels (AHP).....	97
Tableau 60 : Les différentes représentations graphiques des résultats.....	98
Tableau 61 : Les caractéristiques des représentations graphiques testées.....	99
Tableau 62 : Les analyses de sensibilité à mener.....	99
Tableau 63 : Liste des critères retenus par dimension.....	104
Tableau 64 : Échelle d'évaluation du critère R <sub>1</sub> .....	105
Tableau 65 : Échelle du critère R <sub>2</sub> .....	105
Tableau 66 : Échelle d'évaluation du critère R <sub>3</sub> .....	106
Tableau 67 : Échelle du critère R <sub>4</sub> .....	108
Tableau 68 : Échelle d'évaluation du critère Ec <sub>1</sub> .....	109
Tableau 69 : Extrait des critères de mesure du capital client proposé par le Thésaurus de Bercy.....	110
Tableau 70 : Échelle du critère Ec <sub>2</sub> .....	110
Tableau 71 : Échelle du critère Intensité de la demande.....	111
Tableau 72 : Échelle du critère T <sub>1</sub> .....	112
Tableau 73 : Échelle du critère T <sub>2</sub> .....	112
Tableau 74 : Échelle du critère T <sub>3</sub> .....	113
Tableau 75 : Échelle du critère T <sub>4</sub> .....	114
Tableau 76 : Échelle du critère T <sub>5</sub> .....	114

Tableau 77 : Échelle du critère $T_6$ .....	115
Tableau 78 : Échelle d'évaluation du critère $Ter_1$ .....	116
Tableau 79 : Échelle d'évaluation du critère $Ter_2$ .....	117
Tableau 80 : Diversité idéale des moyens de transport .....	118
Tableau 81 : Échelle du critère $Ter_4$ .....	119
Tableau 82 : Nombre d'emplois en ETP en fonction des filières (d'après la bibliographie) .....	119
Tableau 83 : Équations pour l'emploi .....	120
Tableau 84 : Échelle critère $Ter_{5,1}$ .....	120
Tableau 85 : Échelle critère $Ter_{3,2}$ .....	121
Tableau 86 : Échelle du critère $Ter_{5,3}$ .....	121
Tableau 87 : Échelle du critère $Env_1$ .....	123
Tableau 88 : Mise en demeure.....	123
Tableau 89 : Échelle d'évaluation du critère $Env_2$ .....	124
Tableau 90 : Échelle du critère $Env_3$ .....	124
Tableau 91 : Échelle d'évaluation du critère $Env_4$ .....	125
Tableau 92 : Échelle d'évaluation du critère $Env_5$ .....	126
Tableau 93 : Les critères éliminés .....	126
Tableau 94 : Les principaux déchets classés en tant qu'amiante libre .....	133
Tableau 95 : Les principaux déchets classés en tant qu'amiante lié à des matériaux inertes et intègres. ....	133
Tableau 96 : L'estimation des principaux déchets classés en tant qu'amiante lié à des matériaux inertes et intègres .....	134
Tableau 97 : La classification des déchets amiantés .....	134
Tableau 98 : Les déchets interdits en ISDND .....	137
Tableau 99 : Le déchet amianté envoyé par le CPT de Porcheville .....	140
Tableau 100 : Les scores des installations sur le critère $R_1$ .....	141
Tableau 101 : Les scores des deux installations sur le critère $R_2$ .....	141
Tableau 102 : L'échelle du critère $R_3$ Respect du principe de proximité .....	142
Tableau 103 : Les données pour le critère $R_3$ .....	142
Tableau 104 : Les scores des deux installations sur le critère $R_3$ .....	142
Tableau 105 : Les scores des deux installations sur le critère $R_4$ .....	143
Tableau 106 : La synthèse des résultats sur la dimension réglementaire .....	143
Tableau 107 : Un extrait de la base de données pour le cas d'étude .....	145
Tableau 108 : L'échelle du critère $EC_1$ .....	145
Tableau 109 : Les scores des installations sur le critère $Ec_2$ .....	146
Tableau 110 : Les scores des installations sur le critère $Ec_3$ .....	147
Tableau 111 : L'échelle du critère $Ter_1$ — Favoriser l'économie locale.....	148
Tableau 112 : L'échelle du critère $Ter_2$ — Favoriser l'économie locale.....	148
Tableau 113 : Le résumé des hypothèses et des résultats de la comparaison sur les critères $Ter_3$ .....	149
Tableau 114 : Les scores des deux installations sur le critère $Ter_4$ — Emploi.....	149
Tableau 115 : Hypothèses liées au transport .....	151
Tableau 116 : Scores des deux installations sur le critère $Env_2^*$ .....	151

Tableau 117 : Les scores des installations sur le critère Env <sub>3</sub> .....	152
Tableau 118 : Les score des deux installations sur le critère T <sub>1</sub> .....	153
Tableau 119 : Les scores des deux installations sur le Critère T <sub>2</sub> .....	153
Tableau 120 : Les scores des deux installations sur le critère T <sub>3</sub> .....	153
Tableau 121 : L'échelle du critère T <sub>5</sub> .....	154
Tableau 122 : Les scores des deux installations sur le critère T <sub>6</sub> .....	154
Tableau 123 : Les critères d'EC et de CEC.....	157
Tableau 124 : Exemples de codes de déchets européens extraits du CED pour les déchets de bois .....	163
Tableau 125 : Types de panneaux de process.....	165
Tableau 126 : Les bases de données créées .....	169
Tableau 127 : Les principales sources d'informations pour la comparaison des installations .....	171
Tableau 128 : Choix tranché après la discussion.....	175
Tableau 129 : Classification usuelle des sédiments.....	175
Tableau 130. Identification et localisation des installations de gestion de déchets .....	183
Tableau 131 : Les bases de données créées pour les filières de valorisation des sédiments .....	184
Tableau 132 : Caractéristiques des scénarios économiques pour la valorisation des sédiments .....	186
Tableau 133 : Les hypothèses utilisées pour évaluer l'installation V <sub>1</sub> — Céramique sur les critères techniques .....	187
Tableau 134 : Les données utilisées pour comparer les installations sur le critère Env <sub>2</sub> .....	187
Tableau 135 : Production nationale de granulats en 2016 en France adaptée .....	189
Tableau 136 : Les conditions d'utilisation en remblai.....	191
Tableau 137 : Influence des caractéristiques du granulat naturel sur les performances du béton .....	192
Tableau 138 : Possibilité d'aménagement de carrières en fonction de leurs caractéristiques et de leur environnement .....	192
Tableau 139 : Les bases de données créées .....	194
Tableau 140 : Extrait des installations à proximité du CPE de Vitry-sur-Seine.....	195
Tableau 141 : Hypothèses et données de coûts pour l'étude de cas granulats.....	197
Tableau 142 : Les données choisies pour la comparaison des installations sur les critères environnementaux .....	198
Tableau 143 : Résultats bruts sur les critères Ter <sub>3,1</sub> et Ter <sub>3,2</sub> .....	199
Tableau 144 : Apports des études de cas .....	200
Tableau 145 : Exemple fictif d'une analyse qualité - coût (perspective) .....	206
Tableau 146 : Exemple fictif d'une analyse qualité - valeur (perspective) .....	207
Tableau 147 : Exemple de transformation des critères en indicateur de suivi .....	207

# INTRODUCTION GENERALE

Le concept d'économie circulaire est mis en avant depuis une dizaine d'années avec la prise de conscience du caractère non renouvelable de nos ressources. Sa mise en œuvre n'est cependant ni simple, ni évidente, car elle nécessite de prendre en compte des éléments de dimensions très diverses : technique, économique, réglementaire, environnementale, sanitaire, territoriale et sociale. Ces éléments sont liés par la nature même des matières ou des énergies que l'on cherche à gérer et peuvent évoluer indépendamment les uns des autres ou être fortement corrélés.

Le décideur opérationnel doit réaliser des arbitrages lorsqu'il doit faire un choix d'orientation d'un flux de déchets vers une filière. En l'absence de données tangibles, il risque de choisir une solution de valorisation basée uniquement sur un calcul économique de coût moindre ce qui peut mener à retenir l'élimination. Actuellement, ces différentes dimensions sont rarement étudiées de front et relèvent de domaines d'instruction mal établis et pas toujours bien documentés. Le décideur, même s'il est expérimenté, s'appuie principalement sur son expertise, sans possibilité de bénéficier de l'expérience plus large d'un réseau d'experts qui l'aiderait à hiérarchiser les différents critères.

Nous avons pu mesurer auprès de l'UTT, de l'Université de Nantes, de l'ADEME et des membres de l'association RECORD, qu'une vision pragmatique serait considérée comme novatrice, car il y a peu de données cohérentes voire très dispersées et/ou non gérées dans certains de ces domaines.

Le groupe Territoires et Économie Circulaire de la R&D d'EDF construit une démarche globale « *Connaître – Localiser – Évaluer* » permettant de servir de fil conducteur pour la valorisation d'un déchet dans des filières industrielles. Cette approche se décline en trois grandes étapes (*Figure 1*) :

- la première « *Connaître* » requiert de rechercher l'adéquation entre un déchet et des filières de valorisation d'un point de vue essentiellement technique,
- la seconde « *Localiser* » doit tenter de résoudre la question importante de la localisation des installations correspondant aux filières et situées au niveau du territoire, dans un périmètre économique jugé acceptable,
- enfin « *Évaluer* » est un guide qui doit aider le gestionnaire de déchets à choisir l'installation qui répond au mieux à un questionnement multiple. La *Figure 1* ci-dessous permet de montrer l'enchaînement de ces 3 étapes.

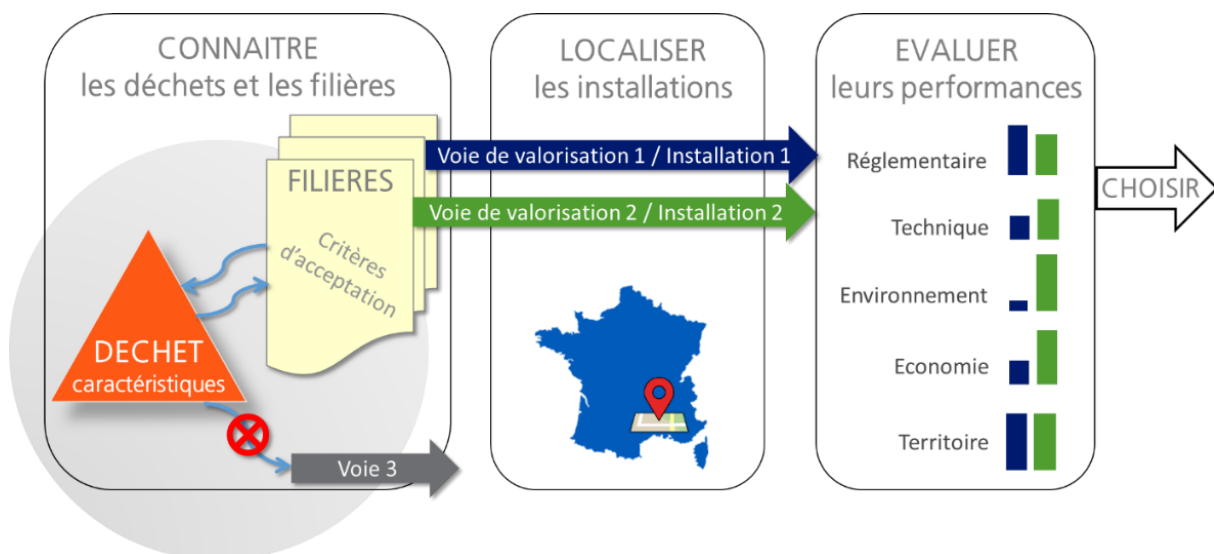


Figure 1 : La démarche Connaître Localiser Evaluer (CLE)

### Connaître :

C'est une démarche itérative de recherche d'éligibilité des déchets aux critères permettant leur intégration en filières industrielles<sup>[1]-[3]</sup>. Elle nécessite de bien connaître à la fois :

- les procédés industriels dans lesquels ces déchets pourraient être valorisés et en particulier les matériaux naturels qu'il serait possible de substituer,
- les caractéristiques physique et chimique de ces déchets.

Elle se décline en trois étapes :

- un premier état des connaissances permet de repérer les voies de valorisation qui semblent possibles en rapprochant les caractéristiques du déchet et les matériaux entrant dans la composition du produit d'origine,
- pour chaque filière de valorisation ainsi présélectionnée, on réalise un descriptif exhaustif de l'ensemble des **critères d'acceptation** attendus pour les matériaux en entrée de filière et qui rendront les déchets éligibles ou non à celle-ci. Ces critères doivent être **hiérarchisés** afin de réduire les coûts d'analyse en ciblant dans un premier temps les paramètres nécessaires et suffisants pour la filière,
- enfin, à partir de cette connaissance de premier niveau, il est possible de réaliser des caractérisations poussées et de vérifier ainsi l'adéquation avec la filière.

Une fois les *filières* de valorisation possibles identifiées, il est important de rechercher la localisation des *installations* de valorisation par rapport au lieu de production du déchet.

### Localiser :

Il s'agit de fixer un périmètre de recherche et d'identifier toutes les installations pertinentes en croisant diverses bases de données nationales<sup>[4]</sup> : SIRENE (INSEE), Astree (Coface), SINOE (ADEME), ICPE (MTES), IREP (MTES), Observatoire des Matériaux (BRGM), Registre parcellaire agricole (IGN), etc.

La façon la plus efficace pour utiliser ces données est de les consulter dans un Système d'Information Géographique (SIG). Il est alors possible de visualiser sur une carte la position du site producteur du déchet, les éventuels sites de prétraitement, les différentes installations de valorisation, les réseaux d'accès par mode de transport, voire d'autres informations géographiques pertinentes dans le périmètre souhaité. À cette étape, une étude plus fine de l'étape « Connaître » peut être nécessaire. En effet, certaines installations peuvent avoir des contraintes plus spécifiques que la filière elle-même.

### Evaluer :

Après avoir localisé les installations de valorisation envisageables, le gestionnaire du déchet doit finalement faire le choix de l'installation vers laquelle il va diriger son flux de déchet. Afin de l'aider dans ce choix, nous proposons d'évaluer et de comparer les performances des différentes installations, selon plusieurs dimensions.

Fort de ce constat, le travail de thèse consiste en l'élaboration d'un outil comparant des installations de gestion de déchets sur cinq dimensions (réglementaire, technique, économique, environnementale et territoriale), via un ensemble de critères et une base de données prédéfinis par des experts.

Ce travail de thèse CIFRE s'est déroulé dans le cadre d'un partenariat de recherche entre EDF R&D porté par le groupe Territoire et Économie Circulaire (TEC) du département Technologies et Recherches pour l'Efficacité Énergétique (TREE) du site EDF Lab Les Renardières, un laboratoire de l'Université de Technologie de Troyes (UTT), le Centre de Recherches et d'Études Interdisciplinaires sur le Développement Durable (CREIDD) et le Laboratoire d'Économie et de Management de Nantes Atlantique (LEMNA) de l'université de Nantes.

---

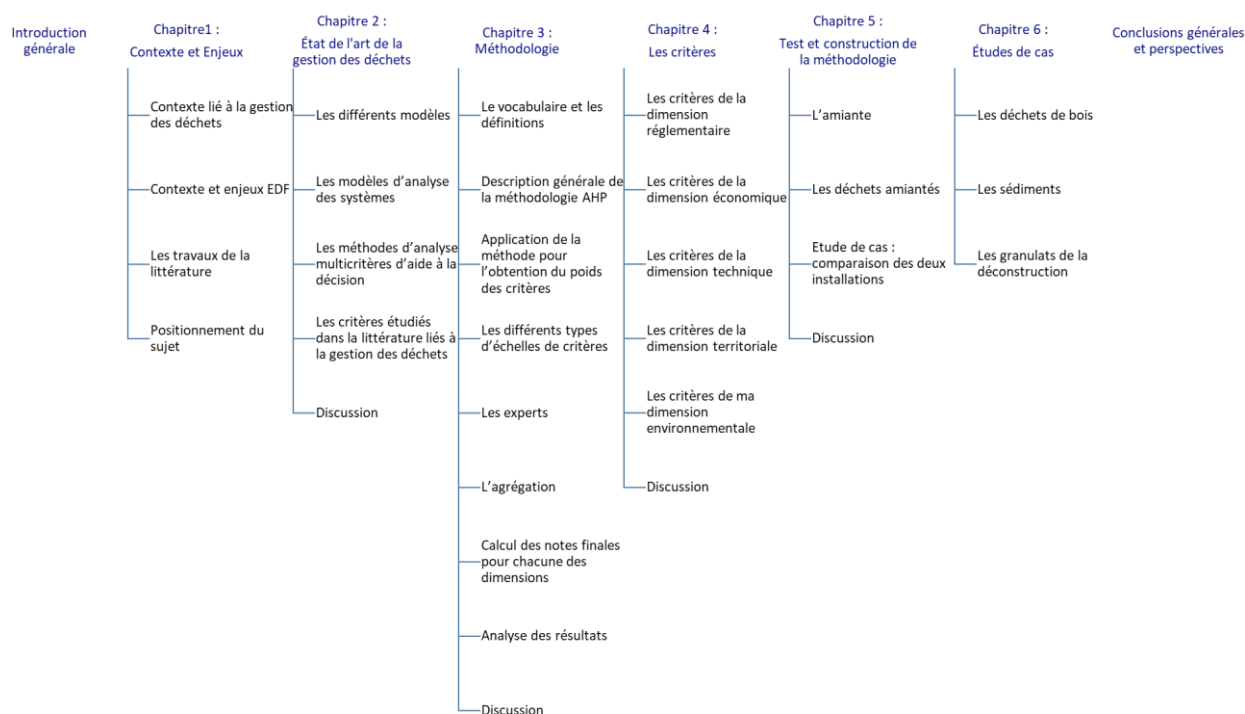
<sup>1</sup> Complémentaires, parfois redondantes, mais aucune ne répondant seule totalement au besoin.

Les travaux ont principalement été effectués sur le site des Renardières, au sein de l'équipe déchets et économie circulaire qui traite les problématiques des grands déchets de l'entreprise :

- les cendres et gypses des centrales à charbon,
- les sédiments fins gérés à terre,
- les déchets de la déconstruction,
- les sols excavés et dégradés.

Lors de ce travail, plusieurs installations de gestion sont comparées à travers différents cas d'études sur les déchets amiantés, le bois, les sédiments d'ouvrages hydroélectriques et les gravats issus de la déconstruction. Celles-ci ont souvent des performances variables selon les dimensions. L'outil donne la possibilité aux décideurs opérationnels de choisir une installation en visant le meilleur compromis entre les cinq aspects étudiés. Selon leur perception du contexte et leur sensibilité, les gestionnaires de déchets peuvent argumenter une décision et disposent d'une base de discussion et de réflexion avec les différents services internes et externes concernés par la gestion des déchets.

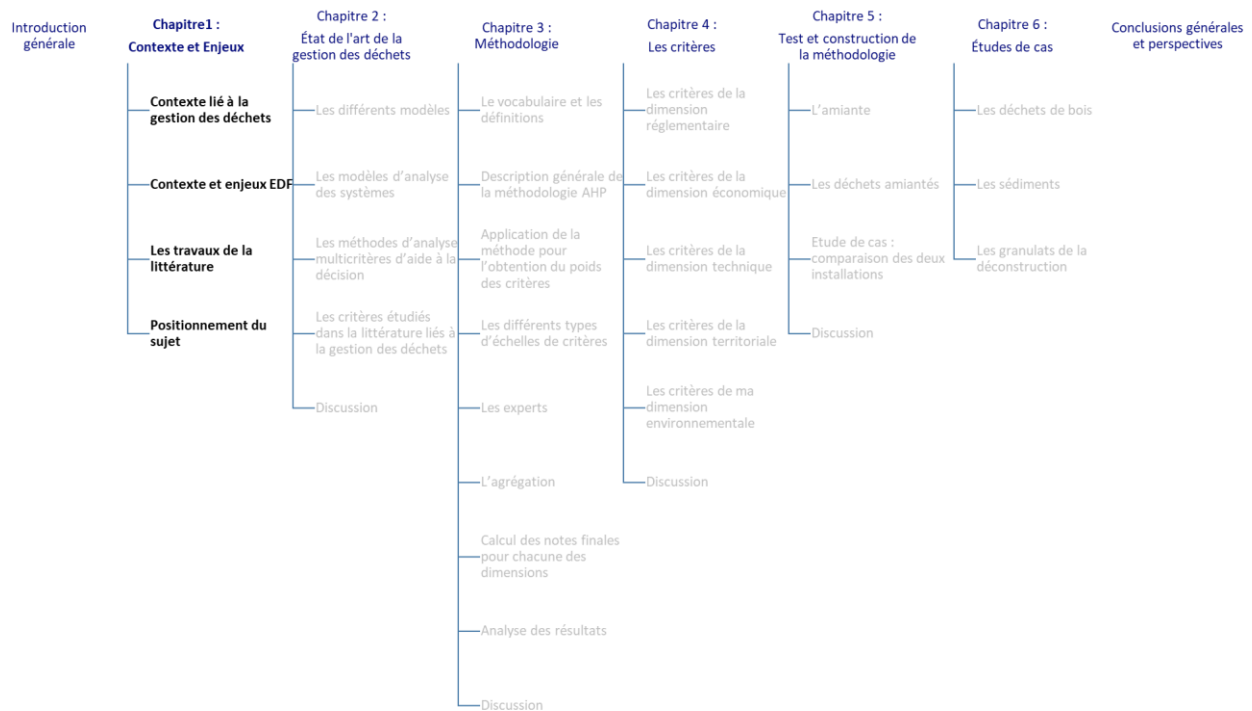
Nous proposons d'exposer le résultat de ces 3 années de recherche selon les 6 chapitres ci-dessous (*Figure 2*) :



*Figure 2 : Structure schématique du document*



# CHAPITRE 1 : CONTEXTE ET ENJEUX



## RESUME

Ce premier chapitre rassemble tous les éléments pour comprendre le contexte et les enjeux de la gestion des déchets. Il s'agit de connaître les raisons qui ont mené à la production de grandes quantités de déchets, les différents types de déchets, les modes de valorisation des pays européens et les textes réglementaires qui encadrent la gestion des déchets.

Dans la seconde partie de ce chapitre, nous présentons les enjeux de la gestion des déchets pour le groupe EDF. Il s'agit d'exposer les quantités de déchets produits par les activités de l'entreprise, les principaux flux de déchets et les moyens mis en place pour les valoriser et répondre particulièrement aux objectifs environnementaux.

En troisième partie, nous abordons de manière succincte les travaux de la littérature. Cette partie nous permet de connaître les différents aspects (économie, environnement, etc.) étudiés dans les publications scientifiques et d'avoir une première connaissance des outils développés pour aider les décideurs dans leur choix d'orientation des flux de déchets.

Enfin, la dernière partie précise le cadre des travaux de thèse, c'est-à-dire les aspects et les flux de déchets étudiés ainsi que la question de recherche. C'est également dans cette section que nous présentons les objectifs et les étapes à réaliser pour répondre aux questionnements scientifiques et opérationnels.



# SOMMAIRE DU CHAPITRE 1

<b>1.1. CONTEXTE LIE A LA GESTION DES CHETS</b>	<b>23</b>
1.1.1.Historique de la gestion des déchets .....	23
1.1.2.Les effets d'une économie linéaire couplée à une consommation de masse .....	23
1.1.3.L'encadrement des pouvoirs publics .....	26
1.1.3.1. La directive-cadre sur les déchets (2008/98/CE) .....	26
1.1.3.2. Le code de L'environnement .....	27
1.1.3.3. Les lois grenelles 1 et 2.....	27
1.1.3.4. La Loi de Transition pour la Croissance Verte (LTCV) .....	28
1.1.3.5. Le concept d'économie circulaire .....	28
<b>1.2. CONTEXTE ET ENJEUX DU GROUPE EDF</b>	<b>30</b>
1.2.1.Les enjeux de la gestion des déchets.....	30
1.2.2.Les outils actuels du groupe.....	31
1.2.3.Un besoin d'améliorer la gestion des déchets .....	32
<b>1.3. LA REVUE DE LITTERATURE</b>	<b>33</b>
1.3.1.Les objets d'étude .....	33
1.3.2.Les outils et méthodes.....	35
<b>1.4. POSITIONNEMENT DU SUJET</b>	<b>36</b>
1.4.1.Une gestion complexe sous plusieurs dimensions .....	36
1.4.1.1. La dimension réglementaire.....	37
1.4.1.2. La dimension technique.....	37
1.4.1.3. La dimension économique .....	37
1.4.1.4. La dimension environnementale .....	38
1.4.1.5. La dimension territoriale.....	38
1.4.2.Problématique .....	39
1.4.3.Présentation des travaux de recherche .....	39

## INTRODUCTION

Le modèle économique des pays développés est remis en cause par les différentes conséquences environnementales dues à son fonctionnement (changement climatique, épuisement des ressources, production de déchets). Depuis plusieurs années, les pouvoirs publics de plusieurs pays du monde et notamment européens incitent notre société à se tourner vers des pratiques plus respectueuses de l'environnement. Ces pays s'engagent vers des stratégies de développement bas carbone afin de limiter les émissions de Gaz à Effet de Serre (GES), en partie responsables du changement climatique. Ils mettent en place différents principes<sup>[5], [6]</sup> comme l'écologie industrielle et territoriale<sup>[7]</sup>, l'écoconception<sup>[8]</sup>, l'économie de fonctionnalité<sup>[9], [10]</sup> ou effectuent des changements dans la politique énergétique du pays<sup>2</sup>.

Récemment, le terme « *économie circulaire* » apparaît dans les stratégies de développement économique de différents pays du monde<sup>[11], [12]</sup> et à l'échelle des continents<sup>[13]</sup>. Ce terme, « économie circulaire », apparaît pour la première fois en 1990 dans le livre « *Economics of Natural Resources and the Environnement* » de David W. Pearce et R. Kerry Turner, deux économistes anglais<sup>[14]</sup>. Ils proposent de convertir, sur la base des travaux de Kenneth E. Boulding, le système linéaire de l'économie en un système circulaire. Aujourd'hui, la communauté scientifique et les organismes institutionnels ne semblent pas s'accorder pour définir ce courant de pensée. Néanmoins, il en ressort un cadre général commun où la mise en place de ce concept doit permettre de dépasser notre modèle de fonctionnement (linéaire) pour tendre vers un modèle circulaire dans le but de limiter les impacts de l'activité humaine sur l'environnement. En effet, ce courant de pensée (cf. §1.1.3.5), d'abord élaboré par des chercheurs industriels et académiques, puis développé à travers des initiatives industrielles<sup>[5], [11], [15]</sup> est aujourd'hui mis en avant par les politiques de plusieurs pays qui incitent à son développement<sup>[14], [16]</sup>. Il doit, notamment, répondre aux enjeux environnementaux soulignés par le *Club de Rome*<sup>3</sup>.

Les fondations de ce concept reposent sur plusieurs approches comme celui du « *Cradle to Cradle*<sup>4</sup> », de « *l'écologie industrielle* », ou encore de « *l'économie de fonctionnalité* »<sup>[6], [14]</sup>. Aujourd'hui, l'Agence de L'Environnement et de la Maitrise de L'Énergie (ADEME) décrit l'économie circulaire à partir de sept piliers répartis en trois domaines d'action (*Figure 3*).



Figure 3 : L'économie circulaire selon l'ADEME

<sup>2</sup> Les moyens de production constituant le mix énergétique ont une influence sur les émissions cycle de vie des activités primaire, secondaire et tertiaire.

<sup>3</sup> Un rapport est paru en 1972 et est intitulé « *The Limits to Growth* »<sup>[17], [18]</sup>. Le rapport est la première étude importante soulignant les dangers écologiques de la croissance économique et démographique que connaît le monde. Il conclut que la poursuite de la croissance économique entraînerait à moyen terme une chute brutale de la population du fait de la pollution, de l'appauvrissement des sols cultivables et de l'épuisement des ressources fossiles.

<sup>4</sup> Du Berceau au Berceau.

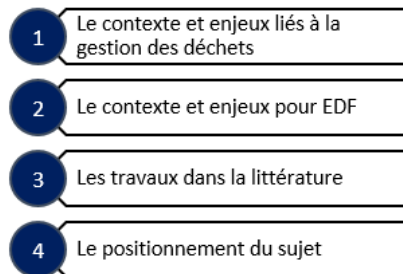
Ces trois domaines permettent de limiter l'apport de matière et d'énergie tout en optimisant leurs usages, l'un d'eux est la gestion des déchets. Cette gestion, vise à réintroduire tout ou une partie d'un déchet dans un cycle de production. Cette définition de l'économie circulaire s'articule pour beaucoup autour du déchet où les deux premiers domaines proposent d'éviter les déchets et le dernier de gérer les déchets ultimes.

Dans le cadre de notre thèse, les travaux ont principalement porté sur la partie « gestion des déchets ». Celle-ci apparaît comme l'un des éléments clés dont dépend la réussite de la transition de nos modèles de fonctionnement linéaire vers une économie circulaire<sup>[19]</sup>.

A ce jour, les pressions environnementales, économiques et sociales confèrent à la gestion des déchets un caractère multidimensionnel avec des enjeux bien distincts et des solutions souvent divergentes dans leurs finalités<sup>[11]</sup>. Or, les outils et méthodes principalement utilisés pour les études de gestion de déchets portent majoritairement sur les dimensions économique et environnementale<sup>[20]</sup> alors que les dimensions technique, territoriale ou encore réglementaire doivent être également, dans la mesure du possible, analysées<sup>[11]</sup>.

Les industriels et les collectivités locales ont la responsabilité d'organiser la bonne orientation des flux vers les filières adéquates en respectant les objectifs de valorisation européens et nationaux. Les décideurs opérationnels doivent choisir entre différentes filières de valorisation. Pour faciliter cet arbitrage, la R&D du groupe Électricité de France (EDF) travaille à l'élaboration d'un outil comparant, via des critères, des installations de gestion de déchets en tenant compte de cinq dimensions à savoir, technique, économique, environnementale, territoriale et réglementaire.

L'objectif premier de ce chapitre est de décrire le contexte et les principaux enjeux liés à la gestion des déchets dans un contexte d'économie circulaire. Ainsi, la *Figure 4* présente de manière schématique les différentes parties composant ce chapitre.



*Figure 4 : L'organisation du chapitre 1*

## 1.1. CONTEXTE LIE A LA GESTION DES CHETS

### 1.1.1. Historique de la gestion des déchets

Pendant la préhistoire, la question de la gestion des déchets ne se pose pas, car la majorité des déchets émis par l'Homme étaient principalement d'origine alimentaire. On commence à s'intéresser aux déchets et à leur gestion à partir de l'antiquité et notamment à Athènes où les premières toilettes publiques ont été installées. Les Romains eux, installèrent des fosses en dehors de la ville. Malgré ces inventions, la gestion des déchets reste rudimentaire, la population dépose ses ordures et les restes d'animaux en dehors des villes.

Au moyen-âge, le développement des villes est plus important, mais la gestion se limite toujours à jeter ses déchets dans la rue et les rivières. Cette « non-gestion » entraîna des odeurs insupportables et le développement de maladies du fait de la présence de bactéries. En conséquence, Philippe Auguste ordonna la création de canaux et de fossés centraux pour nettoyer certains quartiers (principalement à Paris), ce qui conduira au XIII<sup>ème</sup> siècle, au premier règlement. Celui-ci oblige les pouvoirs publics à paver les grandes rues, à nettoyer une fois par semaine les abords de son habitation et à ne pas laisser les ordures et les déchets devant son logement. Cependant, cette réglementation n'est pas respectée par tous et il faudra attendre la Renaissance pour que la situation s'améliore, en taxant les personnes ne respectant pas la loi. C'est aussi à cette période qu'apparaissent les premiers recycleurs appelés chiffonniers<sup>[21], [22]</sup>.

Avec l'industrialisation, la structuration des débouchés des matières récupérées s'accroît. Les premiers réseaux d'égouts font leur apparition, le ramassage des ordures, à l'aide de récipients appelés « poubelle<sup>5</sup> », est effectué par les services municipaux et les premiers centres de traitements des déchets apparaissent. Dans ces centres, les déchets sont triés par des chiffonniers, des ouvriers et des agriculteurs. Ce mode de fonctionnement, où la coopération de différents acteurs permet une « absence » de déchet, est ce que l'on appelle aujourd'hui l'économie circulaire<sup>[1]</sup>. En effet, les chiffonniers récupèrent les papiers, chiffons, tandis que les ouvriers retirent les ferrailles, poteries, tôles émaillées afin de ne laisser que les matières utiles à l'agriculture<sup>[23]</sup>. Plus tard, l'essor des modes de transport (diminution des coûts et du temps de parcours) contribue à l'abandon de ces ressources urbaines (les déchets) pour des matières premières plus abondantes et faciles à obtenir. La fin de la coopération des secteurs urbains, industriels et agricoles a entraîné la société dans une économie linéaire et une quantité importante de déchets mise en décharge<sup>[1]</sup>.

### 1.1.2. Les effets d'une économie linéaire couplée à une consommation de masse

L'impact des sociétés industrielles sur l'environnement local, régional, mais aussi global est de plus en plus important. L'épuisement des ressources, la déforestation, la perte massive de la biodiversité dans les régions tropicales et équatoriales, les émissions de gaz à effet de serre sont des impacts des sociétés industrielles. Une mauvaise gestion des déchets peut entraîner une contamination du sol, de l'eau et de l'air et peut porter atteinte à la santé des humains et des animaux. Mal gérés, ces déchets entraînent une pollution sur de vastes zones, contaminées pour des siècles, c'est ainsi que le « 7<sup>ème</sup> continent », immense plaque de déchets composée principalement de matières plastiques, est apparu dans le nord de l'océan Pacifique, sa surface avoisine le tiers de celle des États-Unis (soit six fois la surface de la France).

En Europe, la quantité de déchets produit sur les dix dernières années est en augmentation (*Figure 5*). Toutefois, on note une forte variabilité entre les pays de l'Union<sup>[24]</sup>. En France, la production de déchets a fortement augmenté entre 2006 et 2010, passant de 312 millions de tonnes à 355 millions de tonnes annuelles,

---

<sup>5</sup> En 1884, le préfet Eugène Poubelle oblige les Parisiens à utiliser un récipient spécial pour déposer leurs ordures ménagères devant leurs portes, afin qu'elles ne soient plus éparpillées dans la rue avant d'être ramassées par les services municipaux. Les parisiens nommeront ce récipient « poubelle »<sup>[23]</sup>.

soit une augmentation de plus de 10 %, mais cette tendance s'inverse à partir de 2012 (-2,8 %), due au ralentissement du secteur de la construction<sub>[25]</sub> et tend vers 328 millions de tonnes de déchets en 2014.

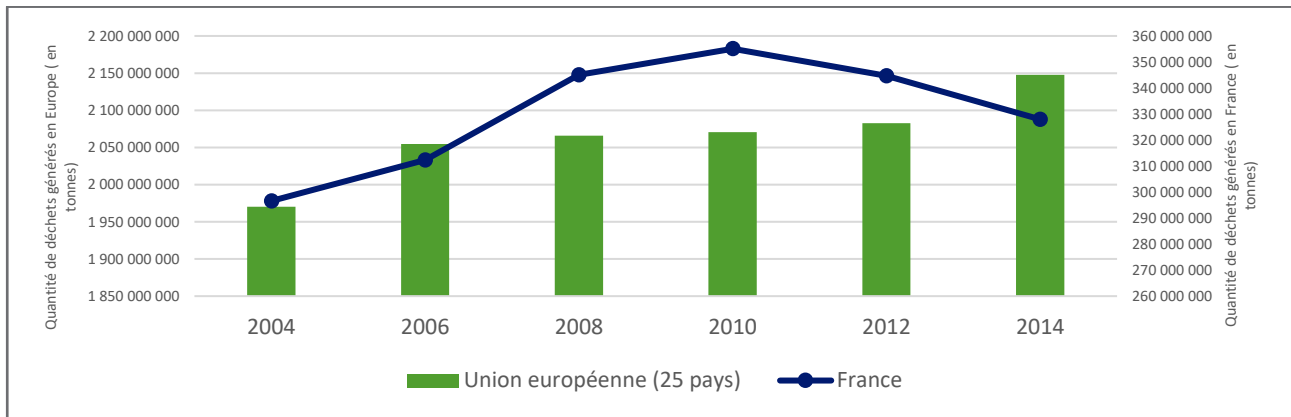


Figure 5 : Quantité de déchets générés en Europe et en France, de 2004 à 2014 d'après Eurostat

En Europe, le volume total de déchets est estimé à près de 2,5 milliards de tonnes en 2012, dont près du tiers est produit par le seul secteur de la construction et de la démolition (Figure 6)<sub>[24]</sub>.

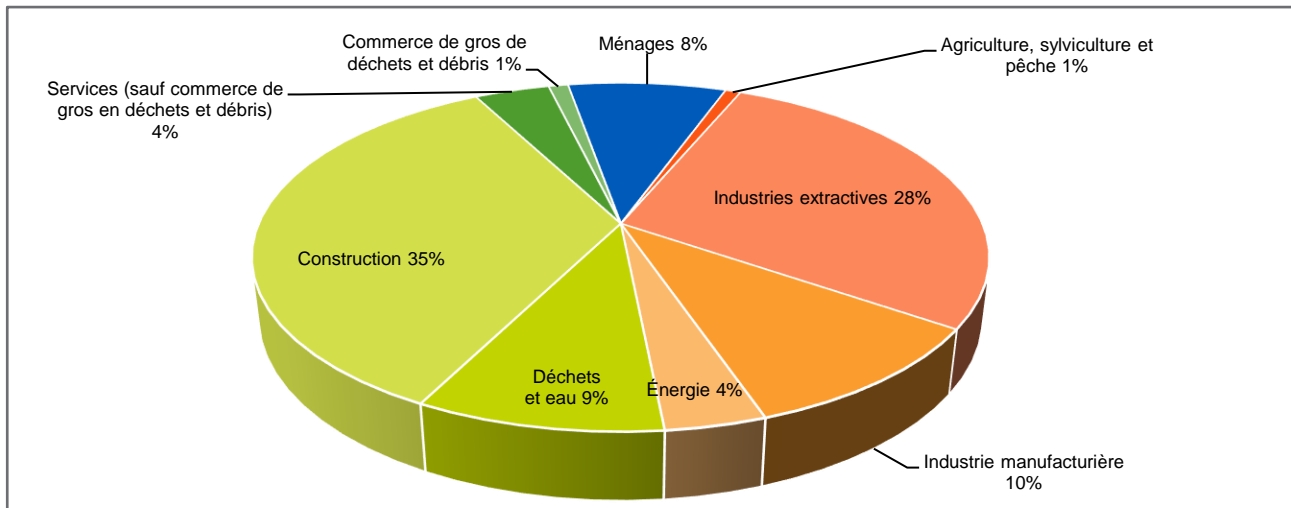


Figure 6 : Déchets produits par les activités économiques et les ménages en 2012, UE-28

Aujourd'hui, la législation européenne encadrant le secteur des déchets comprend de nombreux textes, qui assurent la protection de l'environnement sans perturber le marché intérieur européen. Il en ressort des textes transversaux :

- la directive cadre 2008/98/CE<sub>[26]</sub>,
- le règlement sur les mouvements transfrontaliers.

Ces différents textes (directives et règlements) ont plusieurs objectifs. En premier lieu, ils visent à harmoniser les divergences entre les États membres (Figure 7). En effet, il existe une grande disparité entre les pays de l'UE<sub>[24]</sub> : ceux qui recyclent le moins (90 % mise en décharge, 10 % recyclage et valorisation énergétique) et au contraire, ceux qui sont plus avancés (10 % de mise en décharge, 25 % de valorisation énergétique et 65 % de recyclage).

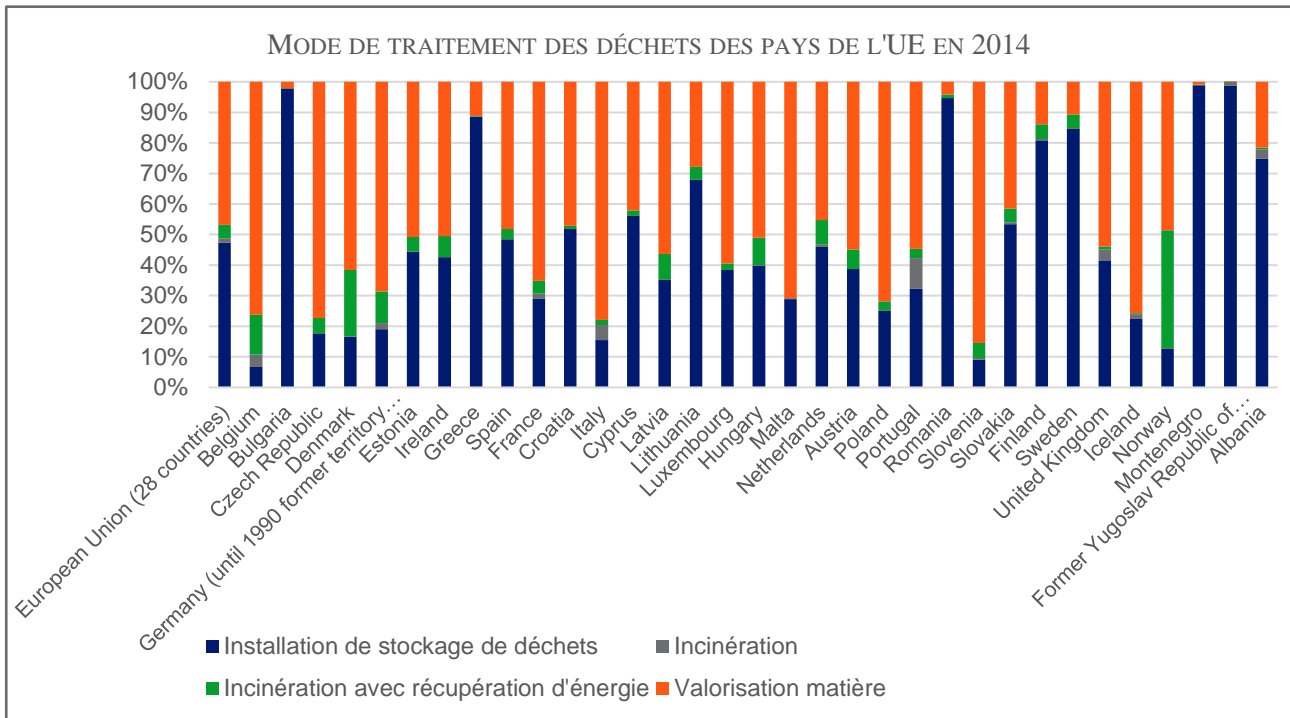


Figure 7 : Mode de traitement des déchets par pays d'après Eurostat

Ainsi, la Bulgarie, la Suède, la Finlande font partie des pays qui éliminent le plus, avec respectivement 98 %, 84 % et 81 % des déchets traités qui sont dirigés vers une filière d'élimination. La Belgique, l'Italie et la République Tchèque sont, quant à eux, les pays qui recyclent le plus. En effet, ces derniers valorisent leurs déchets à hauteur de 88 %, 79 % et 82 % (recyclage et valorisation). On note également que des pays comme le Portugal, l'Italie ou le Royaume-Uni incinèrent des déchets sans valorisation énergétique.

A l'échelle française, la Figure 8 montre qu'en 2012 la France a produit 345 millions de tonnes de déchets, dont 315 millions de tonnes (91 %) sont issues des activités économiques. Plus précisément, le secteur de la construction est responsable de 78 % de la production totale de déchets, soit 247 millions de tonnes.

Enfin, 63 millions de tonnes de déchets sont imputées directement aux activités industrielles (hors BTP)<sup>[25]</sup>.



Figure 8 : La production de déchets en France en 2012 d'après l'ADEME

L'ensemble des déchets (345 millions de tonnes) est réparti selon la typologie suivante :

- 241 millions de tonnes sont des déchets inertes (DI),
- 93 millions de tonnes sont des déchets non dangereux, non inertes (DnDnI),
- 11 millions de tonnes sont des déchets dangereux (DD).

Le mode de consommation actuel entraîne une production de masse et conduit à une augmentation de la quantité de déchets (industriels et ménagers). Pour faire face à la raréfaction des ressources de la planète, les

déchets doivent être considérés comme des matières premières. Conscientes des impacts qu'ils génèrent sur le milieu naturel et sur l'économie, les autorités ont alors adopté un cadre réglementaire pour définir la gestion des déchets.

### 1.1.3. L'encadrement des pouvoirs publics

Les premiers textes réglementaires européens sont apparus suite au premier choc pétrolier, il s'agissait alors non seulement de lutter contre la pollution environnementale, mais aussi de promouvoir les économies d'énergies et de matières premières. En effet, à cette époque, les chocs pétroliers successifs (1973 et 1979) ont fait augmenter les cours des matières premières. C'est alors que les pouvoirs publics ont commencé à envisager les déchets comme une ressource potentielle et une source d'économies pour relancer une Europe dépendante d'une économie linéaire au ralenti.

Ainsi, le premier programme d'action européen avait pour objectif de réglementer l'élimination des déchets toxiques et non biodégradables. Une première directive (75/439/CEE), adoptée en 1975, concerne l'élimination des huiles usagées<sup>[27]</sup>, qui fut suivie de la directive 75/442/CEE, en juillet de la même année, dont le champ d'application s'est élargi à tous les déchets. La politique de l'UE dans ce domaine vise à découpler l'utilisation des ressources et la production de déchets de la croissance économique, tout en garantissant que la consommation ne va pas au-delà de ce que l'environnement peut supporter.

La réglementation relative aux déchets en France s'appuie à la fois sur des textes européens et nationaux (Figure 9). L'Europe établit des directives dans l'objectif de coordonner les états membres vers une politique de gestion des déchets commune. Les états transposent ces directives-cadres dans leurs législations nationales. Les règlements et les décisions européens sont eux directement applicables.

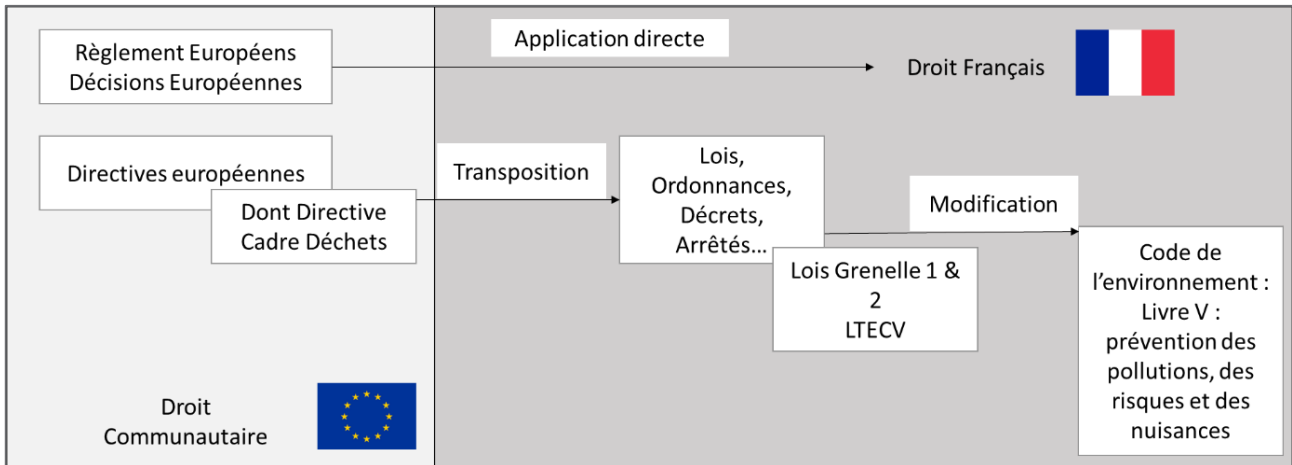


Figure 9 : Représentation schématique de l'articulation entre réglementation européenne et réglementation française

Ainsi, la **Directive Cadre sur les Déchets** (cf. §1.1.3.1) a été transposée en droit français par plusieurs textes qui ont conduit à la modification du **Code de l'Environnement** (cf. §1.1.3.2). Par ailleurs, certaines lois comme les **Lois Grenelle 1 et 2** (cf. §1.1.3.3) découlent de la **Directive 2008/98/CE** et viennent également modifier ce code. Enfin, la **Loi de transition Énergétique pour la Croissance Verte** (LTECV) (cf. §1.1.3.4) a doté la France d'objectifs en termes de valorisation des déchets.

#### 1.1.3.1. La directive-cadre sur les déchets (2008/98/CE)

Dans un contexte où la production de déchets tend à augmenter au sein de l'Union, la directive 2008/98/CE « établit un cadre juridique pour le traitement des déchets au sein de la Communauté » et « vise à protéger



*l'environnement et la santé humaine par la prévention des effets nocifs de la production et de la gestion des déchets* »<sup>[26]</sup>.

Cette directive énonce des règles et des définitions qui viennent structurer le droit européen en matière de gestion des déchets. Elle comporte un certain nombre de notions essentielles qui sont à la base de la réglementation française sur les déchets :

- le principe pollueur-payeur : si une activité entraîne une pollution, le coût de cette pollution (supportée par la collectivité) doit être pris en charge par le pollueur,
- la responsabilité élargie des producteurs (REP) : Les producteurs de produits, concernés par les filières REP, doivent procéder eux-mêmes à la gestion de leurs produits en fin de vie. Ils ont en charge l'organisation, la collecte et le traitement de leurs produits lorsqu'ils sont en fin de vie (déchets),
- le principe de proximité : demande au producteur de « *gérer les déchets au plus près du lieu de production* »,
- la hiérarchisation des modes de traitement des déchets : demande de prioriser la prévention, le réemploi, le recyclage, la valorisation et de n'éliminer qu'en dernier recours,
- la nécessité d'obtention d'une autorisation pour tout établissement ou entreprise désireux procéder au traitement de déchets avec, notamment la quantité et le type de déchets traités, la méthode utilisée, ainsi que les opérations de suivi et de contrôle,
- les bases d'un processus de sortie du statut de déchet,
- des objectifs chiffrés de recyclage, de récupération et de valorisation à l'échéance de 2020 :
  - le réemploi et le recyclage des déchets ménagers : le papier, le métal, le verre et le plastique devront atteindre un minimum de 50 % en poids global,
  - le réemploi, le recyclage et la valorisation matière des déchets de construction et de démolition à hauteur de 70 % en poids.

### 1.1.3.2. Le code de L'environnement

Le Code de l'Environnement correspond à une compilation des différents textes réglementaires et législatifs relatifs à l'environnement. Les dispositions relatives aux déchets font l'objet du Titre IV du Livre V du Code, relatif à la prévention des pollutions, des risques et des nuisances. Le Code de l'Environnement regroupe donc les grands principes du cadre réglementaire français en ce qui concerne les déchets :

- la définition de la notion de déchet,
- la réduction de la quantité et de la nocivité des déchets dès la production du produit,
- la responsabilisation du producteur du déchet jusqu'à l'élimination de ce dernier,
- le principe de proximité : organisation du transport des déchets et limitation en termes de distance (plans départementaux et régionaux),
- la hiérarchisation du traitement des déchets : réemploi, recyclage, valorisation, élimination,
- l'information du public.

### 1.1.3.3. Les lois Grenelles 1 et 2

En septembre et octobre 2007, le gouvernement français a organisé le Grenelle Environnement. Il s'agissait de rencontres politiques (de partis français) visant à prendre des décisions à long terme en matière d'environnement et de développement durable. Dans le domaine des déchets, trois objectifs y ont été définis :

- réduire à la source la production de déchets en responsabilisant fortement les producteurs, de la conception du produit à sa fin de vie. L'objectif est de réduire la production d'ordures ménagères de 7 % par habitant pendant les cinq prochaines années, soit une réduction de plus de 5 kg par an et par habitant,
- augmenter le recyclage de déchets ménagers et assimilés vers des filières de recyclage (matière et organiques) à un taux de 35 % en 2012 et 45 % en 2015,
- diminuer la quantité de déchets partant en incinération et en stockage de 15 % d'ici à 2012.



La Loi Grenelle 1 formalise les 268 engagements du Grenelle Environnement. Elle a été complétée en 2010 par la loi portant sur l'engagement national pour l'environnement, dite Loi Grenelle 2, qui en décline les objectifs en dispositions plus précises<sup>[28]</sup>.

Ces textes mettent l'accent sur la valorisation des déchets, en visant le développement de certaines filières jugées prioritaires, telles que le recyclage des matières et la diminution du recours aux filières d'élimination. Par ailleurs, on note un renforcement de la gestion de certains flux de déchets particuliers avec la mise en place des filières REP pour les Déchets Diffus Spécifiques (DDS), les Déchets d'Éléments d'Ameublement (DEA) et l'instauration d'une collecte sélective obligatoire pour les bio-déchets des gros producteurs.

### 1.1.3.4. La Loi de Transition pour la Croissance Verte (LTCV)

La LTCV a doté la France de nouveaux objectifs de valorisation des déchets. Tout d'abord, elle doit augmenter la quantité de déchets faisant l'objet d'une valorisation sous forme de matière, notamment organique, en orientant vers ces filières de valorisation 55 % en masse des déchets non dangereux non inertes (NDNI) en 2020 et 65 % en masse en 2025. De plus, 70 % des déchets du BTP devront être valorisés en 2020. Ensuite, elle impose que la valorisation énergétique ne doit jamais se substituer à la prévention ou à la valorisation matière lorsque celles-ci sont possibles<sup>[29]</sup>.

Enfin, l'élimination des déchets est une perte de ressources qui doit être réduite au strict minimum. C'est pourquoi, le Décret n° 2016-288 du 10 mars 2016 comportant diverses dispositions d'adaptation et de simplification dans le domaine de la prévention et de la gestion des déchets a précisé un certain nombre de mesures en faveur du tri à la source et de la valorisation matière de certaines catégories de déchets non dangereux. En effet, depuis le 1er juillet 2016<sup>[30]</sup>, le tri à la source et la collecte séparée des déchets de papier, de métal, de plastique, de verre et de bois, en vue de leur réutilisation et de leur recyclage, sont rendus obligatoires pour une large majorité d'entreprises. Les déchets « 5 flux » peuvent ainsi être :

- triés selon leur nature en un ou plusieurs contenants distincts,
- collectés tous ensemble et conservés en mélange dans un contenant unique (1 contenant pour l'ensemble des « 5 flux » triés et séparés des autres déchets).

Le tri à la source et la collecte séparée des déchets « 5 flux » doit permettre leur réutilisation et leur recyclage<sup>[30]</sup>. De plus, la France a pour objectif de diminuer par deux la quantité de déchets mise en installation de stockage à l'horizon 2025.

### 1.1.3.5. Le concept d'économie circulaire

Depuis une vingtaine d'années, la France s'est fixé des objectifs pour réduire l'élimination des déchets et augmenter leur valorisation. Aujourd'hui, il s'agit de décloisonner cette approche orientée essentiellement sur la gestion de la fin de vie des produits et de donner une impulsion aux actions menées en amont. En effet, dans un contexte de tension sur les approvisionnements en matières premières il y a un enjeu environnemental, social et économique à consommer aussi peu de ressources que possible<sup>[31]</sup>. Il s'agit de réduire l'utilisation de ressources pour une même production, de produire des biens qui durent le plus longtemps possible et qui en fin de vie seront recyclables dans des cycles ultérieurs. Cependant, les besoins de la société ne cessent d'augmenter<sup>[14], [31]</sup>.

La transition vers une économie circulaire, lancée par la Commission européenne en mai 2015 et la loi sur la transition énergétique (cf. §1.1.3.3), impliquent un changement du modèle économique actuel. Pour répondre à cette ambition, le paquet européen sur l'économie circulaire, consacre tout un volet à la gestion des déchets<sup>[13]</sup>. Il y est prévu des objectifs chiffrés pour 2030, à savoir :

- mettre au maximum 10 % des déchets en mélange en installation de stockage de déchets (ISD),

- interdire la mise en ISD des déchets triés,
- recycler 65 % des déchets municipaux,
- recycler 75 % des déchets d’emballages,
- réduire de 30 % le gaspillage alimentaire en 2025.

En cohérence avec l’Europe, la France s’est engagé à réaliser la transition vers un modèle d’économie circulaire. Il s’agit de passer d’un modèle économique actuel « linéaire » (extraire, produire, consommer, jeter) à un modèle « circulaire ». Ce modèle intègre l’ensemble du cycle de vie des produits de leurs productions éco-conçues à la gestion des déchets qui en résultent avec comme objectif de « boucler la boucle » en réutilisant et en recyclant un maximum de matières. Ce concept d’économie circulaire est présent dans plusieurs textes de loi français, notamment dans la loi Grenelle 1<sub>[32]</sub> (cf. §1.1.3.3) qui prévoit une politique de réduction des déchets qui passera notamment par l’écoconception du produit à sa fabrication, sa distribution et sa consommation jusqu’à sa fin de vie. Cette politique renvoie aux trois domaines d’action décrits par l’ADEME dans sa définition de l’économie circulaire (Figure 10).



Figure 10 : L’économie circulaire selon l’ADEME

La transition vers une économie circulaire constitue une étape importante qui engendrera d’importants bénéfices environnementaux, économiques, mais aussi en termes d’innovations, de création d’emplois et d’activités. Le changement de filières de traitement de déchets permettra également de réduire les émissions de gaz à effet de serre de 3,4 MteCO<sub>2</sub> par an en 2025. Dans le même temps, la réorientation des flux de déchets entraînera un surcoût de fonctionnement annuel, pour les producteurs de déchets, estimé à 1,5 milliard d’euros en 2025.

Ainsi, la gestion des déchets est aujourd’hui confrontée à des problématiques environnementales et économiques qui doivent être étudiées conjointement.

Par ailleurs, la compétence de gestion des déchets n’incombe pas qu’aux seuls producteurs, les collectivités territoriales sont également sollicitées pour l’atteinte des objectifs en matière de prévention, de recyclage et pour créer les installations de traitements nécessaires. Les territoires sont donc au cœur cette transition, en déclinant de manière opérationnelle les avancées de la LTECV. La démarche implique une forte mobilisation politique et participative et passe nécessairement par une implication de l’ensemble des parties prenantes concernées (associations, entreprises, citoyens, administrations, commerces...).

Pour finir, la loi portant sur la Nouvelle Organisation de la République (NOTRe) d’août 2015 a permis de clarifier et de rendre pleinement opérationnelle la répartition des compétences entre les différents échelons territoriaux<sub>[33]</sub>. Les conseils régionaux portent désormais la responsabilité de la planification territoriale de la prévention et de la gestion des déchets. Cette planification va permettre de coordonner à l’échelle régionale

les actions entreprises par l'ensemble des parties prenantes concernées par la transition vers l'économie circulaire. Ils ont également la possibilité d'accompagner financièrement des actions qui seraient particulièrement intéressantes pour le territoire.

Nous avons constaté que la gestion des déchets est de plus en plus complexe, de par leur nature et leurs volumes. Pour faire face aux enjeux environnementaux et économiques, l'Europe et la France ont engagé une transition vers une économie circulaire. Bien que les objectifs de prévention, de réduction et de valorisation des déchets concernent majoritairement les déchets ménagers et assimilés et les déchets du secteur de la construction, les déchets industriels et plus largement les déchets des activités économiques représentent une part importante du volume de déchets produits et doivent être pris en compte.

## 1.2. CONTEXTE ET ENJEUX DU GROUPE EDF

Le groupe Electricité De France (EDF) est créé en tant qu'Établissement Public à caractère Industriel et Commercial (EPIC) par une loi de 1946 qui nationalise et regroupe les 1450 entreprises françaises de production, de transport et de distribution d'électricité. En 2004, le monopole régulé des sociétés nationales de production d'énergie en France laisse place à un marché de concurrence sous l'impulsion de l'Union Européenne. Ainsi, EDF change de statut pour devenir une Société Anonyme (S.A.) et ouvre son capital. Aujourd'hui, l'état français est actionnaire majoritaire d'EDF S.A. en détenant 84,5 % du capital.

Le groupe EDF est l'un des premiers énergéticiens au monde (capacité installée) et regroupe l'ensemble des métiers liés à l'électricité : la production, le transport, la distribution et le commerce. Le mix électrique produit par EDF est essentiellement assuré par ses Centres Nucléaires de Production d'Electricité (CNPE) et par ses installations hydrauliques (*Figure 11*). Réseaux de Transport d'Électricité (RTE) et Enedis, filiales du groupe, sont responsables du transport et de la distribution de l'électricité sur le territoire français<sup>[34]</sup>.

Comme tout industriel, le groupe EDF produit différents types de déchets qu'il convient de gérer.

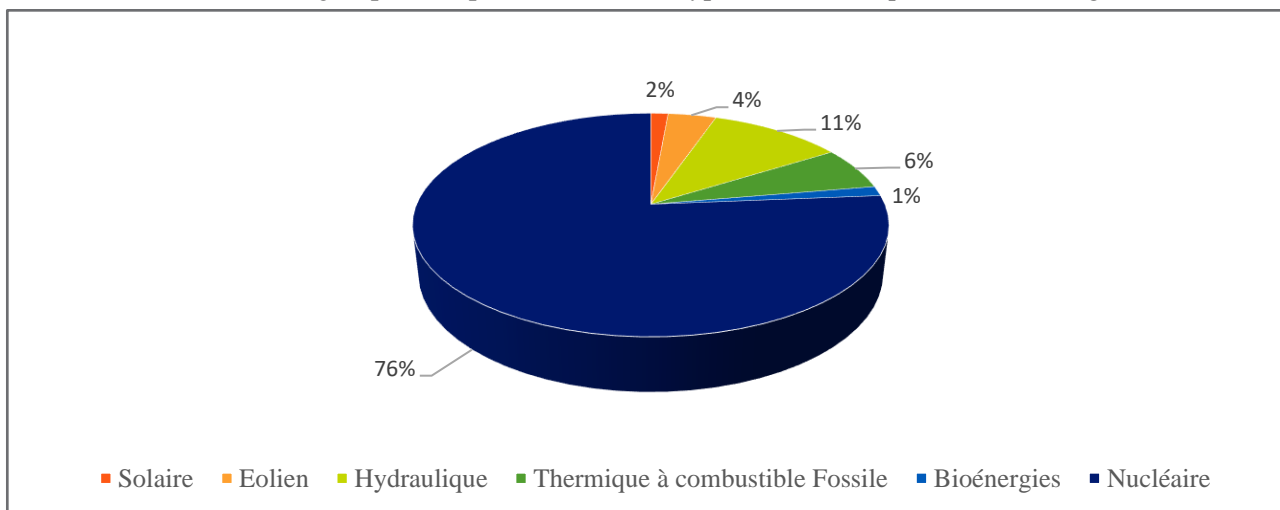


Figure 11 : Part des moyens de production de l'électricité en France en 2015

### 1.2.1. Les enjeux de la gestion des déchets

Le Groupe EDF produit en moyenne environ 400 000 tonnes de déchets industriels par an (*Tableau 1*). Ces déchets, dits conventionnels, sont des déchets non radioactifs, produits et traités par l'ensemble des sites de production (thermique, hydraulique, nucléaire)<sup>[35]</sup>.

Tableau 1 : Volume de déchets industriels conventionnels produits par EDF

GROUPE EDF	UNITE	2014	2015	2016	2017
Volume de déchets industriels conventionnels valorisés ou évacués en vue de valorisation	t	392 815	365 744	607 171	-

En 2015, le volume de ces déchets s'est élevé à 365 744 tonnes (*Tableau 1*), dont 65 % sont produits en France (systèmes insulaires compris)<sup>[36]</sup>. Ces déchets sont majoritairement liés aux activités de construction, de déconstruction et de maintenance. L'augmentation significative du volume de déchets conventionnels pour l'année 2016 est essentiellement due à des déchets non dangereux issus des grands chantiers en cours en France :

- les déblais associés à la réalisation des diesels d'ultime secours prévus dans le plan d'action post-Fukushima sur les centrales de production nucléaire,
- les travaux de mise en place d'un nouveau groupe de production à la centrale de La Coche (73) pour la production hydraulique,
- les travaux d'extension d'un bâtiment de stockage à Velaines (55),
- la poursuite des travaux de déconstruction du parc thermique, notamment à Albi (81), Champagne (60) et Aramon (30).

Le groupe est engagé dans une politique de développement durable et est certifié ISO 140001 : Système de Management de l'Environnement. Il a mis en place une politique de gestion des déchets conforme aux principes définis dans la directive-cadre sur les déchets à savoir, réduire le volume et la dangerosité des déchets industriels conventionnels, favoriser le recyclage et la valorisation.

Depuis 2010, les engagements du groupe sont concrétisés par des objectifs chiffrés de valorisation. En 2016, le taux moyen de valorisation des déchets de la liste verte (cf. §1.2.2) était de 98,7 % (*Tableau 3*). Ce taux est supérieur à 90 % (*Tableau 2*) pour l'ensemble des déchets conventionnels (liste verte incluse).

Tableau 2 : Taux de valorisation des déchets

TAUX DE VALORISATION DES DECHETS	UNITE	2014	2015	2016	2017
Groupe EDF	%	79,9	80,6	89,9	-
EDF	%	92,6	92,5	95,3	-
EDF Energy	%	98,5	94,5	99,1	-

Les indicateurs sur les déchets du groupe sont suivis par les commissaires aux comptes des données extra financières, la DREAL<sup>6</sup> et l'ASN<sup>7</sup> (nucléaire) et lors d'audits dans le cadre de la certification ISO 14001.

Tableau 3 : Taux de valorisation de la liste verte

EDF	UNITE	2014	2015	2016	2017
Taux de valorisation des déchets de la liste verte	%	97,3	96,6	98,7	-

La gestion des déchets est un enjeu important pour le groupe puisque l'entreprise produit environ 260 types de déchets avec un coût de traitement estimé entre 50 et 80 millions d'euros par an.

### 1.2.2. Les outils actuels du groupe

Actuellement, EDF possède quatre principaux outils internes traitant de la gestion des déchets :

<sup>6</sup> Directions Régionales de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement

<sup>7</sup> L'Autorité de Sécurité Nucléaire

- l’outil OGIDE pour Outil de Gestion et d’Inventaire des Déchets à EDF.

Celui-ci a plusieurs fonctionnalités :

L’alimentation d’une base de données sur les déchets produits par le groupe (quantité, provenance, traitement, etc.) et leur devenir,

- la traçabilité des déchets via l’édition des bordereaux de suivi<sup>8</sup>. Cette fonctionnalité permet de suivre le retour des bordereaux par l’intermédiaire d’alertes en prévenant le gestionnaire lorsque les BSD n’ont pas été saisis dans les délais prescrits par la réglementation,
- la vérification de la validité de certains documents réglementaires.
- l’édition du registre réglementaire. Les exploitants des établissements qui produisent ou expédient des déchets doivent tenir à jour un registre où sont consignés tous les déchets sortants. Ce document est obligatoire pour toute entreprise. Il permet d’assurer de manière chronologique la traçabilité des déchets sortant de l’entreprise. Il doit être conservé 3 ans minimum,
- la Liste verte.

Cette liste est un référentiel des déchets conventionnels considérés comme valorisables par le groupe EDF. Elle se présente sous la forme d’un tableur Excel qui recense, pour chaque déchet évacué par les sites, les filières de traitement adéquates vis-à-vis de la réglementation et des exigences de la politique développement durable d’EDF SA. Il recense les déchets dits « valorisables », soit 152 catégories de déchets sur les 260 existantes dans le référentiel interne des déchets produits par le groupe<sup>9</sup>. Pour augmenter le taux de déchets valorisés, EDF s’impose un objectif de valorisation du tonnage de 90 % minimum pour les déchets figurant sur la liste verte (*Tableau 4*).

*Tableau 4 : Objectif national de valorisation de la liste verte*

ANNEE	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Taux de valorisation de la liste verte	75 %	85 %	90 %	90 %	90 %	90 %	90 %

- La plateforme d’échange SIED (Système d’Information et d’Échange sur les Déchets industriels)

Ce forum de discussion permet de mettre en relation les gestionnaires de déchets, les responsables par métier et des experts de leur gestion. Cette plateforme d’échange regroupe également l’ensemble de la documentation interne EDF liée à la gestion des déchets,

- Le guide déchet

Il indique la réglementation en vigueur et comprend des retours d’expérience d’utilisateurs. Ce guide de gestion des déchets industriels a été élaboré dans l’objectif d’optimiser la prévention et la gestion des déchets en améliorant les coûts et en tenant compte des enjeux environnementaux.

### 1.2.3. Un besoin d’améliorer la gestion des déchets

L’objectif des travaux de recherche est d’appuyer les gestionnaires de déchets d’EDF, voire d’autres industriels, dans leur choix de voies de valorisation. En effet, les industriels et les collectivités locales ont la responsabilité d’organiser la bonne orientation des flux vers les filières adéquates en respectant les objectifs de valorisation européens et nationaux. Aujourd’hui, les décideurs opérationnels sont amenés à réaliser des arbitrages lorsqu’ils font un choix d’orientation de déchets vers une filière. Par exemple :

<sup>8</sup> Le bordereau de suivi de déchets (BSD) comporte des indications sur la provenance des déchets, leurs caractéristiques, les modalités de collecte, de transport et d’entreposage, l’identité des entreprises concernées et la destination des déchets. Le bordereau accompagne les déchets jusqu’à l’installation destinataire qui peut être un centre d’élimination, un centre de regroupement, un centre de pré-traitement ou une installation de valorisation.

<sup>9</sup> Les déchets de la liste verte représentent 92 % de la quantité totale de déchets conventionnels évacués.

- Comment faire un choix entre éliminer un **déchet amianté** en installation de stockage ou le valoriser via une fusion par torche à plasma ?
- Comment arbitrer pour le devenir **des sédiments** d'un barrage sur le Rhin entre l'élimination dans un polder à Rotterdam ou la réalisation de remblais végétalisés à 50 km de l'ouvrage ?
- Comment choisir entre une valorisation énergétique du **bois** et une valorisation matière ?
- Comment décider entre la valorisation d'**un granulat issu de la déconstruction** en technique routière, la valorisation en comblement de cavités, ou en réintégration dans un béton ?

Ces choix sont généralement étudiés sur les plans économique, réglementaire et environnemental (au niveau ICPE). Toutefois, ils gagneraient à s'insérer dans une démarche globale en tenant compte d'autres critères et des dimensions technique et territoriale (cf. §1.4.1).

Dans la section suivante, nous nous intéressons aux domaines étudiés dans les travaux issus de la littérature. Il s'agit d'avoir une connaissance générale sur les flux de déchets, les systèmes de gestion, les objectifs des études, les aspects pris en compte et sur les outils et méthodes utilisés. Le *Chapitre 2* présentera un état de l'art plus ciblé des travaux existants.

### 1.3. LA REVUE DE LITTÉRATURE

Les travaux de la littérature portant sur la gestion des déchets sont nombreux. Plus précisément, *A. Vitorino de Souza Melaré, S. Montenegro González, K. Faceli et V. Casadei* ont recensé près de 7600 articles liés « *aux outils* » et à « *l'aide à la décision* » dans le domaine des déchets<sup>[37]</sup>. La méthodologie de recherche par mots clés qui a été adoptée montre que les bases de données Web of Knowledge, IEE et Web of Science sont les plus actives (*Tableau 5*).

*Tableau 5 : Nombre de publications portant sur les déchets par base de données scientifiques.*

BASE	NOMBRES DE PUBLICATIONS	%
IEE	1895	25 %
Science direct	203	3 %
Web Of science	1764	23 %
Scopus	985	13 %
Web of Knowledge	2137	28%
ACM	665	9 %

En complément, les auteurs ajoutent que la majorité des études viennent d'Asie, d'Amérique du Nord et de l'Europe.

#### 1.3.1. Les objets d'étude

Une revue bibliographique, portant sur les déchets, a été effectuée par *Astrid Allesch et Brunner* en 2014. Elle se base sur l'analyse de 151 études scientifiques (articles, rapports et conférences)<sup>[20]</sup>. L'analyse de cette revue permet d'identifier :

- les objectifs des études,
- les déchets et les systèmes étudiés,
- les différentes dimensions prises en compte dans les analyses,
- les méthodologies et outils employés.

Il est possible de classer ces études selon quatre objectifs (*Tableau 6*). Le premier qui représente 60 % des études concerne l'évaluation de différents scénarios de gestion des déchets dans le but de trouver le meilleur. Ensuite, près d'un tiers des études concerne l'évaluation des performances d'une stratégie ou d'une filière dans



l'objectif d'augmenter son efficacité et seulement 10 % des publications présentent des comparaisons de filières ou de choix de gestion. Enfin, 3 % portent sur l'évaluation d'un projet et d'une stratégie par rapport à des objectifs ou des lois.

Tableau 6 : Les objectifs des études liées à la gestion des déchets d'après Astrid Allesch et Brunner.

DESCRIPTION DE L'OBJECTIF :	TROUVER LE MEILLEUR SCENARIO D'UN SYSTEME DE GESTION DES DECHETS	COMPARER DES TERRITOIRES OU UN SYSTEME DE GESTION.	ÉVALUER UN SYSTEME DE GESTION DES DECHETS POUR AMELIORER	ÉVALUER UN PROJET OU UNE STRATEGIE PAR RAPPORT A DES OBJECTIFS DEFINIS.
% de travaux	59 %	11 %	27 %	3 %

Ensuite, si l'on associe les articles scientifiques à un rang de la hiérarchie de gestion des déchets, on note que la recherche porte sur les trois derniers rangs. En effet, 96 % des articles concernent principalement l'élimination, la valorisation et le recyclage (Tableau 7). Une des explications peut être que ces trois derniers rangs représentent le plus souvent des systèmes industriels complexes. Cette complexité technique des procédés de recyclage, de valorisation et d'élimination, associée à l'augmentation des pressions environnementales et réglementaires engendre des questionnements auxquels les scientifiques tentent de répondre. De plus, ces modes de traitement sont encore beaucoup utilisés dans plusieurs pays de l'Union européenne (Figure 7).

Tableau 7 : Les systèmes étudiés par rapport à la hiérarchie de gestion des déchets européenne d'après Astrid Allesch et Brunner.

HIERARCHIE DE GESTION DES DECHETS	% D'ETUDES
La prévention	2 %
Le réemploi	2 %
Le recyclage	27 %
La valorisation	35 %
L'élimination	34 %

Nous avons vu, précédemment, que la majorité des déchets produits en Europe (Figure 6) et en France (Figure 8) sont majoritairement des déchets issus de la construction et de la déconstruction. Toutefois, les travaux d'Astrid Allesch and Paul H Brunner montrent que la majorité des études portent sur les déchets ménagers et assimilés (Tableau 8)<sup>[20]</sup>, alors que ces derniers ne représentent qu'une faible part de la production de déchets.

Tableau 8 : Les flux de déchets examinés dans les études scientifiques d'après Allesch et Brunner.

LES PRINCIPAUX FLUX ETUDES DANS LES PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES					
Les déchets organiques	Les déchets solides	Les déchets ménagers et assimilés	Les autres déchets	Les déchets en mélanges	Les D3E
6 %	12 %	52 %	16 %	8 %	6 %

Cette observation s'explique, probablement, par le fait que la gestion des déchets ménagers et assimilés est complexe à différentes étapes de son fonctionnement. Premièrement, ce flux peut être composé de plusieurs types de déchets comme les déchets verts, les encombrants, des ordures ménagères, le verre, les plastiques, des emballages métalliques et quelques déchets des activités économiques. Ensuite, la responsabilité de ces déchets est du ressort des collectivités (ce ne sont pas les particuliers qui emmènent leurs déchets vers un point de traitement), elles ont donc en charge l'opération de collecte<sup>[38]</sup>. Ce mode de gestion est complexe du fait des moyens mis en œuvre pour mobiliser le gisement disponible, où dans la majorité des cas, plusieurs communes sont concernées. Enfin, il existe plusieurs alternatives pour trier et gérer les différents types de déchets ménagers, ce qui engendre des scénarios différents ayant des impacts sur l'emploi, le coût, les recettes, la logistique, mais aussi sur les aspects sociaux et politiques<sup>[39]</sup>.

### 1.3.2. Les outils et méthodes

Des auteurs précisent que la gestion des déchets est un système complexe en lien avec plusieurs dimensions. Néanmoins, peu d'études proposent une analyse avec plus de trois dimensions<sup>[40], [41]</sup>. En effet, la prise en compte de différents aspects dépend à la fois des méthodes, des outils utilisés et des objectifs des études. Notre revue de la littérature nous a permis d'identifier plusieurs modèles et outils d'analyse ayant été étudiés et/ou utilisés dans la thématique des déchets. Ces derniers sont présentés plus précisément dans le *Chapitre 2 État de l'art* selon le format suivant :

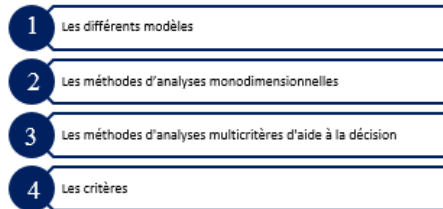


Figure 12 : Organisation du chapitre 2

Il ressort de notre analyse des articles scientifiques que les outils et les modèles visent particulièrement l'étude de la dimension environnementale de la gestion des déchets. Cette mise en avant, vient probablement du développement de méthodologies et d'outils basés sur le « *Life Cycle Thinking (LCT)*<sup>10</sup> » qui s'est largement développé au début des années 1990.

Pour faire face à la complexité de la gestion des déchets, qui fait appel à des dimensions différentes (autre que l'environnement) et pouvant être contradictoires, les scientifiques se sont également tournés vers les méthodes multicritères d'aide à la décision. Elles sont de plus en plus utilisées dans les études de gestion de déchets<sup>[41], [42]</sup>, mais leur utilisation reste marginale dans les applications<sup>[43]</sup>. Elles permettent de prendre en considération des facteurs environnementaux, politiques, économiques, socio-économiques, réglementaires, territoriaux et techniques<sup>[40]</sup> en tenant compte de plusieurs critères<sup>[20], [44]</sup>.

A ce jour, des méthodes sont appliquées à la gestion des déchets et permettent l'intégration de critères de différentes dimensions que *Coelho, Lange et Coelho* ont classifié en quatre groupes principaux (*Figure 13*)<sup>[42]</sup>.

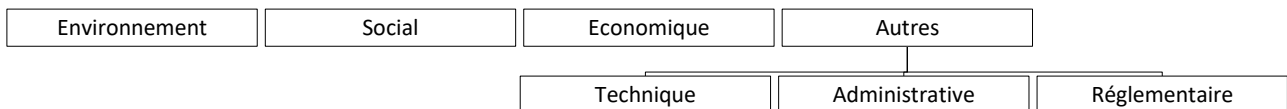


Figure 13 : Les 4 groupes de critères d'un système de management des déchets d'après *Coelho, Lange et Coelho*

<sup>10</sup> La pensée cycle de vie



Dans le cadre d'une évaluation d'une stratégie de gestion, ce sont les dimensions environnementales (11 %) et économiques (4 %) qui sont majoritairement étudiées par ces méthodes (Figure 14). L'association des méthodes multicritères avec la dimension environnementale peut s'expliquer par le fait que cette dernière est majoritairement utilisée dans les articles (via les Analyses de Cycle de Vie) et que cette méthode fournit une information environnementale sous plusieurs catégories d'impacts qui peuvent ensuite être étudiées par les méthodes multicritères.

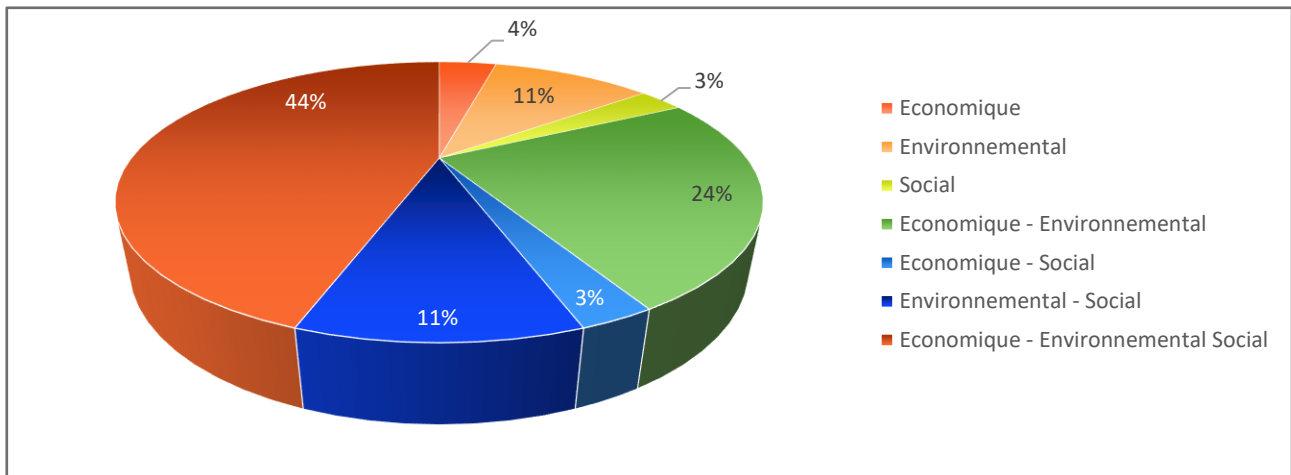


Figure 14 : Les aspects et les combinaisons étudiées dans l'évaluation de la gestion des déchets par des méthodes multicritères d'après Coelho, Lange et Coelho

Néanmoins, on remarque également que les dimensions économique, environnementale et sociale (Figure 14) sont les plus étudiées (44 %) ensemble. Cela montre que le système déchet est à l'intersection de plusieurs dimensions et notamment celles qui définissent le développement durable<sup>[42]</sup>. Ensuite, ce sont les duos économique et environnement (24 %) et environnement et social (11 %) qui sont les plus analysés. Enfin, dans une moindre mesure, les dimensions économique et social sont étudiées ensemble (3 %). Les dimensions réglementaires et politiques sont peu développées dans les études scientifiques. Ce choix s'explique par le fait que ces notions sont spécifiques à un pays donné, ce qui les rend complexes à appréhender et à généraliser dans les scénarios.

## 1.4. POSITIONNEMENT DU SUJET

La France s'est engagée dans une démarche d'économie circulaire (cf. §1.1.3.5), ambition qui est concrétisée depuis août 2015, par l'adoption de la loi de transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) et de ses décrets d'application<sup>[45]</sup>. L'adoption de cette loi et l'écriture d'une feuille de route pour l'économie circulaire confirment la volonté de la France de changer de modèle économique et de placer l'économie circulaire au cœur de la transition énergétique et écologique (COP21).

La gestion des déchets est l'un des piliers de la réussite de cette transition. Cependant, elle est complexe à aborder du fait de son côté multidimensionnel.

### 1.4.1. Une gestion complexe sous plusieurs dimensions

En France, le terme « déchet » a connu plusieurs évolutions de sa définition<sup>[21]</sup>. Aujourd'hui, le déchet est défini « *comme 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 défaitre* »<sup>[46]</sup>.

Les producteurs de déchets doivent gérer leurs déchets dans le respect de la réglementation en vigueur et les différentes dimensions sont indirectement citées dans la définition du principe de proximité (article L541-1) du code de l'environnement<sup>[46]</sup> :

« Le respect de ce principe et notamment l'échelle territoriale pertinente, s'apprécie en fonction de la nature des déchets considérés, de l'efficacité environnementale et technique, de la viabilité économique des modes de traitement envisagés et disponibles à proximité pour ces déchets, des débouchés existantes pour ces flux et des conditions techniques et économiques associées à ces débouchés, dans le respect de la hiérarchie de la gestion des déchets et des règles de concurrence et de libre circulation des marchandises ».

Les parties ci-dessous décrivent brièvement ces différentes dimensions.

#### 1.4.1.1. La dimension réglementaire

La réglementation n'impose aucune filière de traitement malgré la hiérarchie, mais établit des règles pour certains déchets et types de traitements, pour des catégories de déchets admissibles ou non dans les filières qu'elle définit en fonction de leurs identités et/ou de leurs caractéristiques. S'il est évident que le choix d'une installation de valorisation de déchets doit se faire dans le respect de la réglementation, les principes qu'elle énonce, les règles concernant les déchets et les types de traitement sont nombreuses (cf. §1.1.2 et §1.1.3) et peuvent induire des choix différents selon le décideur opérationnel. La réglementation est donc une dimension intéressante à étudier et évaluer à part entière.

#### 1.4.1.2. La dimension technique

La vision cycle de vie du déchet fait ressortir la notion de ressources que des industriels pourraient intégrer dans leurs procédés. Dans ce contexte, il est important de connaître et de s'assurer de la compatibilité du déchet avec le fonctionnement et la finalité de la filière. Récemment, un ouvrage de l'association RECORD<sup>11</sup>, intitulé « déchets et économie circulaire »<sup>[1]</sup> présente en première partie une démarche itérative de recherche d'éligibilité des déchets aux critères permettant leur intégration en filières industrielles<sup>[2]</sup>. Par ailleurs, Bruno Debray décrit cette même approche comme étant la première étape de sélection d'une filière<sup>[47]</sup>. En effet, la filière de traitement et/ou de valorisation dépend avant tout de la compatibilité physico-chimique du déchet avec la finalité de la filière et aussi, de la compatibilité du déchet vis-à-vis du fonctionnement de cette filière (flux, quantité, qualité). Il est alors évident que la dimension technique doit être prise en compte dans le choix d'une installation de gestion de déchets.

#### 1.4.1.3. La dimension économique

Sur le plan économique, les auteurs Bruno Debray, Lupton, Rogaume et Marcoux et al s'accordent à dire qu'un déchet est un objet dont la valeur économique est très souvent nulle ou négative pour son détenteur à un moment et un lieu donné<sup>[1], [38], [47], [48]</sup>. En effet, lors d'un échange de marchandises classiques, la direction entre le flux physique et le flux monétaire est inversée, mais évolue dans le même sens lorsqu'il s'agit de déchets (Figure 15)<sup>[48], [49]</sup>.

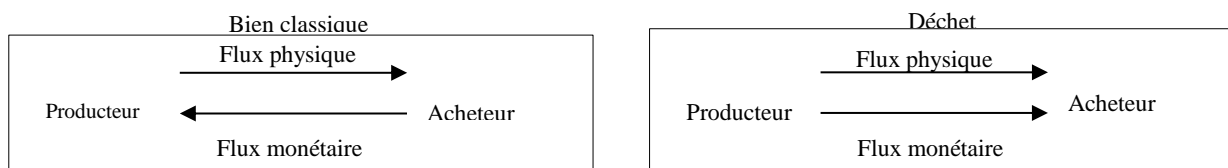


Figure 15 : Comparaison des flux monétaires et physiques entre un bien classique et un déchet

<sup>11</sup> Recherche coopérative sur les déchets et l'environnement.

Il est évident que cette approche dépend essentiellement du déchet. Les métaux, le verre, le papier ou certains plastiques par exemple, sont entrés dans un processus de recyclage depuis longtemps et ont ainsi acquis, une valeur marchande positive. Néanmoins, cette valeur fluctue et se retrouve parfois supérieure à la valeur marchande d'une matière première nouvellement extraite. En conséquence, les déchets représentent, dans la plupart des cas, un coût pour le producteur de déchets. De plus, on retient trop facilement la mesure des coûts évités de mise en installation de stockage comme mesure du succès d'une initiative de valorisation. La dimension économique est cruciale pour le gestionnaire de déchets, mais ne doit pas seulement se résumer au montant dont il devra s'acquitter pour traiter et valoriser ou éliminer son déchet. Cependant, l'étude de cette dimension est marginale dans la littérature<sup>[20], [43]</sup>, car les bases de données sont peu nombreuses et la pression concurrentielle rend les acteurs économiques relativement discrets.

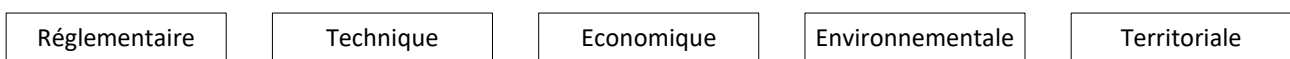
#### 1.4.1.4. La dimension environnementale

L'approche environnementale se justifie dès lors qu'un déchet est produit, il peut constituer une menace pour l'environnement. C'est pourquoi les déchets pouvant éventuellement causer des dommages à l'environnement et à la santé humaine sont identifiés par un (\*) dans la nomenclature européenne des déchets<sup>[46]</sup>. Celle-ci détermine le caractère dangereux du déchet en fonction de ses propriétés physico-chimiques. Néanmoins, afin de juger des impacts environnementaux, la directive-cadre portant sur les déchets stipule qu'une analyse de type ACV doit permettre d'instruire un dossier de demande de dérogation à l'ordre de hiérarchie des traitements imposés aux déchets. Il convient alors d'effectuer une analyse environnementale qui comptabilise à la fois les impacts générés (collecte, transport, procédé de traitement, etc.) et les impacts évités (par exemple, l'économie de matières premières et d'énergie grâce à la valorisation). C'est la dimension la plus étudiée et discutée par la communauté scientifique dans le cadre de la gestion des déchets<sup>[20], [43], [44], [50]</sup>.

#### 1.4.1.5. La dimension territoriale

Les territoires sont des acteurs importants de la gestion des déchets<sup>[22]</sup> puisque c'est aux régions que revient la responsabilité des plans de gestion des déchets<sup>[33]</sup>. Elles doivent, en collaboration avec les acteurs du territoire, définir un plan de gestion des déchets pour les années à venir. De plus, le choix du gestionnaire d'orienter son déchet vers une filière de gestion particulière implique des impacts positifs et/ou négatifs pour les territoires concernés (lieu de production et lieu de traitement) qu'il est important d'appréhender. Aujourd'hui, cette dimension n'est pas ou très peu abordée dans les études bien qu'elle soit présente de manière indirecte. En effet, le territoire n'est jamais vu comme une dimension à part entière, mais plutôt comme dimension « support » dans les scénarios de cas d'études.

La gestion des déchets dans un contexte d'économie circulaire est alors confrontée à un problème : celui de faire cohabiter dans une même logique ces dimensions très différentes<sup>[1]</sup>. Le travail de thèse se focalise sur les 5 thèmes (*Figure 16*) :



*Figure 16 : Les 5 dimensions étudiées pour les travaux de recherche*

En conclusion, c'est l'aspect pluridisciplinaire, sous cinq dimensions, qui rend notre travail innovant. Ces dimensions sont rarement étudiées de front et peu de données existent pour certaines d'entre elles ou sont très dispersées. La gestion des déchets est un sujet complexe et pluridisciplinaire où il faut concilier les enjeux économiques et environnementaux<sup>[49]</sup>, identifier les leviers et les freins de la réglementation, les critères techniques relatifs aux déchets et aux filières<sup>[4], [51]</sup>. De plus, cette compétence de gestion qui incombe désormais aux régions renforce la dimension territoriale.

### 1.4.2. Problématique

Les gestionnaires doivent conjuguer des impacts de ces cinq dimensions qui peuvent les mener à des choix opposés. Pour appuyer la décision des gestionnaires de déchets, il existe plusieurs outils d'aide au choix et de justification d'une voie de valorisation<sup>[44]</sup>. Le plus souvent, ces outils abordent principalement la dimension environnementale (cf. §1.4.1.4), en se basant sur la méthodologie ACV<sup>[20], [44]</sup>. Cependant, ils présentent des lacunes de flexibilité, d'adaptabilité et d'utilisation pour analyser différentes dimensions. En effet, certains d'entre eux peuvent être difficiles à appréhender pour un utilisateur non averti et/ou nécessitent une connaissance et des jeux de données importants pour fiabiliser les résultats. Ainsi, la gestion des déchets est souvent tributaire de l'expérience des gestionnaires et par conséquent, bien que des outils d'aide à la décision soient disponibles, sur une ou plusieurs dimensions, le recours aux approches empiriques demeure le moyen le plus employé par les gestionnaires<sup>[52]</sup>.

Dans un contexte où l'économie circulaire est au centre des attentions<sup>[13], [29]</sup>, la gestion des déchets vise à atteindre un optimum technique, économique, environnemental, réglementaire et territorial. Ces observations indiquent que de nouvelles méthodes sont nécessaires en matière de gestion des déchets.

### 1.4.3. Présentation des travaux de recherche

Comme nous l'avons vu, les évolutions réglementaires, la transition vers une économie circulaire et le développement de plusieurs solutions de gestion des déchets poussent les décideurs opérationnels à choisir entre différentes filières de valorisation, en prenant en compte plusieurs dimensions. Pour faciliter cet arbitrage complexe, la R&D du Groupe EDF en partenariat avec le Centre de Recherches et d'Études interdisciplinaires sur le Développement Durable (CREIDD) de Troyes rattaché à l'Université de Technologie de Troyes (UTT) et le Laboratoire d'Économie et de Management de Nantes-Atlantique rattaché à l'Université de Nantes (LEMNA) a souhaité développer un outil comparant, via des critères, des installations de gestion de déchets en tenant compte de cinq dimensions à savoir, technique, économique, environnementale, territoriale et réglementaire.

Les réflexions et le développement du référentiel font l'objet d'une thèse, intitulée :

***Conception d'un outil multicritères d'aide à la décision pour la valorisation des déchets industriels***

Dans le cadre de ce travail, l'outil a été appliqué sur quatre déchets particuliers :

- les déchets amiantés,
- les sédiments d'ouvrages hydro-électriques,
- les granulats de béton issus de la déconstruction,
- les déchets de bois.

Il découle de cette problématique industrielle un questionnement principal :

***Comment, à partir d'outils et de méthodes approuvés par la communauté scientifique, évaluer et comparer des installations de gestion des déchets selon les cinq dimensions retenues ?***

Pour répondre à cette interrogation, nous avons établi cinq objectifs scientifiques qui par ailleurs correspondent aux différents chapitres du manuscrit de thèse (*Figure 17*). Dans le détail il s'agit :

- de prendre connaissance des outils et des méthodes pouvant être utilisés dans un contexte de gestion des déchets (*Chapitre 2*),
- de construire, via une démarche recherche-action, un outil d'évaluation et de comparaison des installations en intégrant les cinq dimensions préalablement définies (*Chapitre 3*),
- d'établir la liste des critères d'évaluation de chacune des dimensions (*Chapitre 4*),
- d'ajuster le modèle créé sur le cas des déchets amiantés (*Chapitre 5*),

- de valider le modèle sur des cas d'étude précis : produire des jeux de données afin d'évaluer et de comparer des installations de gestion pour des déchets de bois, des granulats de béton issus de la déconstruction et pour des sédiments (*Chapitre 6*).

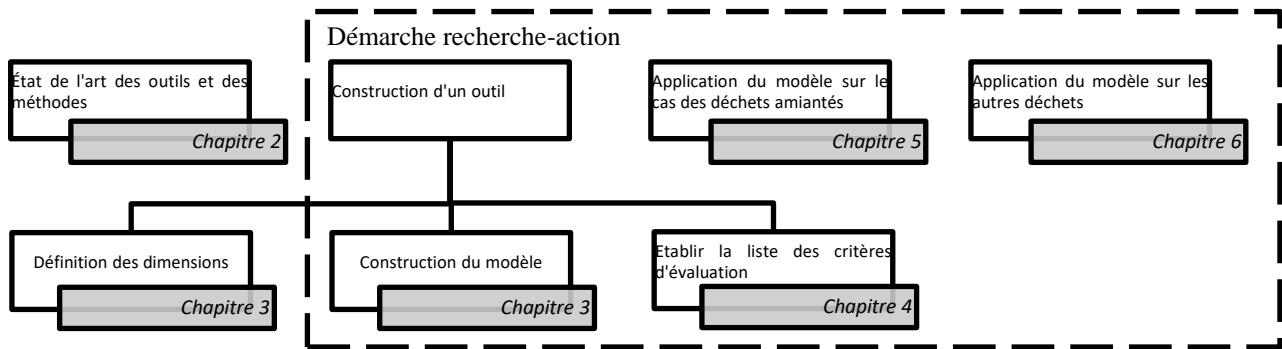


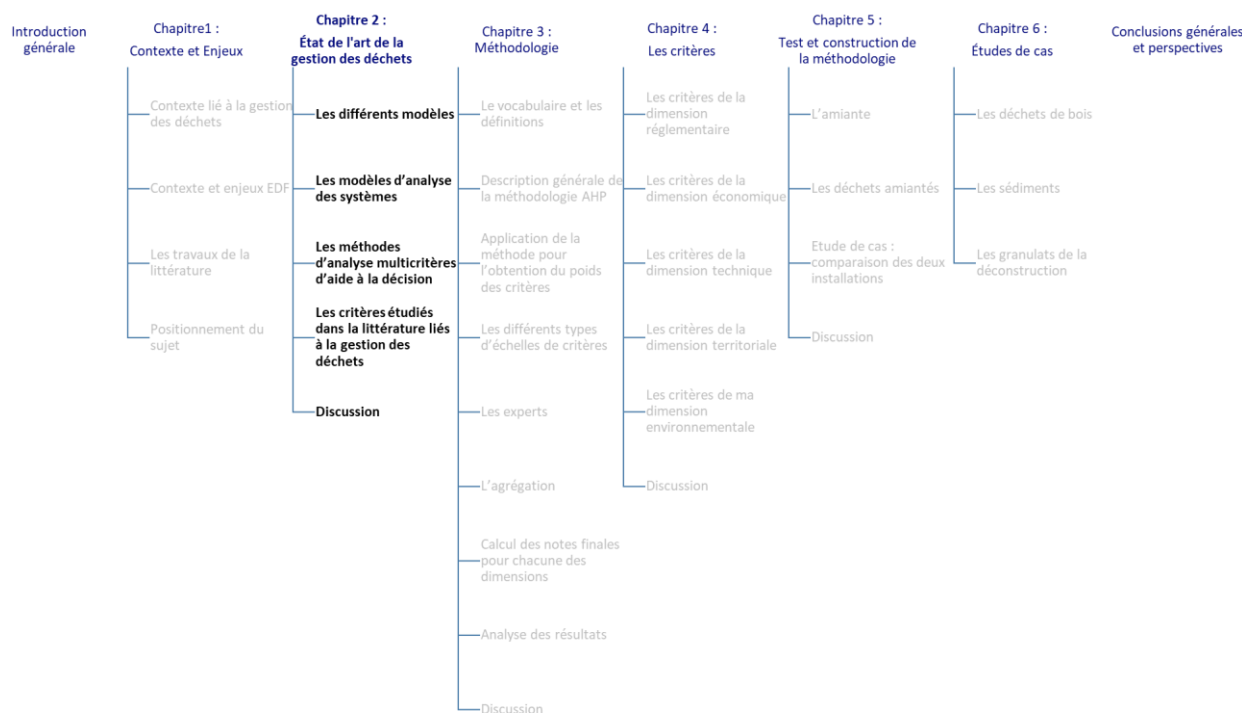
Figure 17 : La démarche générale des travaux de thèse

La construction d'un outil multicritères évaluant et comparant des installations de gestion de déchets selon plusieurs dimensions pose différents problèmes de construction :

- Comment construire les échelles d'évaluation des différents critères retenus pour rendre le modèle utilisable pour plusieurs déchets ?
- Comment intégrer dans le modèle, des critères qualitatifs et quantitatifs ayant des unités de mesure différentes ?
- Quelles sont les données à utiliser ?
- Quels sont les profils d'experts à mobiliser ? Quel est le nombre d'experts à mobiliser ? Comment les questionner et intégrer leurs avis ? Comment prendre en compte des avis divergents ?
- Comment visualiser et interpréter les résultats issus des évaluations et des phases de comparaison ?

Ces verrous méthodologiques et opérationnels seront levés au fur et à mesure de l'avancée des travaux et présentés dans les chapitres concernés.

# CHAPITRE 2 : ÉTAT DE L'ART



## RESUME

Ce chapitre rend compte des différentes méthodes de gestion utilisées dans le cadre de la gestion des déchets. Ces méthodologies couvrent un large spectre, allant de l'évaluation à la comparaison de plusieurs systèmes de gestion. Des outils proposent également une aide à la décision pour l'orientation d'un flux de déchets ou pour le choix de construction d'une nouvelle unité de traitement.

Nous avons choisi de décomposer notre revue bibliographique en 3 grandes parties. Nous présentons tout d'abord les modèles d'évaluation des systèmes, ces derniers sont principalement des outils généralistes n'abordant qu'une seule dimension (économique ou environnementale). Néanmoins, ils peuvent être multicritères, comme l'Analyse de Cycle de Vie (ACV). Nous décrivons également dans cette section les outils propres à la gestion des déchets.

Ensuite, nous détaillons les méthodes d'analyses multicritères. Ces méthodes, provenant de la recherche opérationnelle, sont aujourd'hui appliquées à de nombreux champs dont la gestion des déchets. Nous verrons que ces outils sont divisés en deux familles bien distinctes, les outils de l'école française et belge et les outils de l'école américaine.

Enfin, à la dernière section nous présentons les critères que nous avons relevés. Ces derniers sont énumérés selon les 5 dimensions étudiées.

## SOMMAIRE DU CHAPITRE 2

<b>2.1.LES DIFFERENTS MODELES</b>	<b>44</b>
2.1.1.Les outils d'évaluation des systèmes .....	44
2.1.2.Les modèles d'ingénierie des systèmes .....	45
2.1.3.Discussion des différentes méthodologies .....	47
<b>2.2.LES MODELES D'EVALUATION DES SYSTEMES</b>	<b>47</b>
2.2.1.Les outils et méthodes d'analyses environnementales.....	47
2.2.1.1. L'analyse de cycle de vie.....	48
2.2.1.2. Analyse de Cycle de Vie déchets.....	49
2.2.1.3. La démarche Material Flow Accounting/Analysis.....	52
2.2.1.4. Les outils et méthodes d'analyses économiques.....	52
2.2.1.5. Le Life Cycle Costing (LCC) .....	53
2.2.1.6. Le Cost Benefits Analysis (CBA).....	55
2.2.1.7. Le Material Flow Cost Accounting (MFCA).....	56
<b>2.3.LES METHODES D'ANALYSE MULTICRITERES D'AIDE A LA DECISION</b>	<b>57</b>
2.3.1.Les méthodes MADM et MDOM.....	57
2.3.1.1. Les méthodes d'inspiration américaine.....	58
2.3.1.2. Les méthodes d'inspiration française et belge .....	58
2.3.1.3. Discussion des méthodes d'analyses multicritères d'aide à la décision.....	59
2.3.1.4. Choisir une méthode multicritères.....	61
2.3.2.La méthode Analytic Hierarchy Process (AHP) .....	63
<b>2.4.LES CRITERES ETUDIES DANS LA LITTERATURE LIES A LA GESTION DES DÉCHETS</b>	<b>67</b>
2.4.1.Les critères environnementaux .....	67
2.4.2.Les critères économiques.....	69
2.4.3.Les critères territoriaux .....	69
2.4.4.Les critères techniques.....	71
2.4.5.Les critères réglementaires .....	72
2.4.6.Discussion à propos des différents critères identifiés dans la littérature.....	72
<b>2.5.DISCUSSION</b>	<b>73</b>



## INTRODUCTION

---

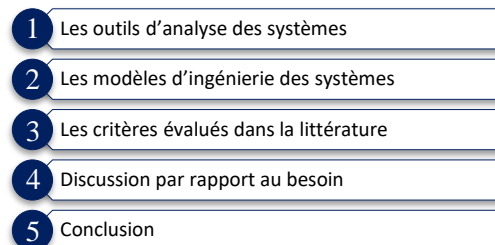
Une analyse des travaux de la littérature montre qu'il existe de nombreux modèles pour étudier et/ou aider un décideur opérationnel à prendre une décision par rapport à un flux de déchet<sup>[44], [53], [54]</sup>. L'approche moderne de la gestion des déchets vise à orienter les flux de manière à répondre au mieux aux principes du développement durable et à limiter les impacts négatifs sur l'ensemble des dimensions. En conséquence, la gestion des déchets tente d'intégrer les notions technique, environnementale et territoriale en sus des traditionnels aspects économique et réglementaire. Il est difficile pour les décideurs opérationnels de choisir entre différentes installations de valorisation, en se basant sur une analyse complète<sup>[52]</sup>.

Dans ce chapitre, il s'agit de présenter les outils disponibles qui peuvent être utilisés dans le cadre d'une gestion de déchets. *Chang et al* proposent de les classer en deux catégories<sup>[53]</sup> :

- les outils d'évaluation des systèmes
- les modèles d'ingénierie des systèmes.

La première catégorie propose d'évaluer la performance d'un système à partir de démarche telles que l'Analyse de Cycle de Vie (ACV), le Material Flow Analysis (MFA) ou encore l'Analyse des Risques (RA) alors que la seconde, regroupe les méthodes de simulation, d'optimisation, d'analyses coût-bénéfices ou encore les méthodes d'aide à la décision. Les premières peuvent être multicritères (comme l'ACV), mais ne traitent majoritairement qu'une seule dimension (l'environnement par exemple) alors que les secondes peuvent être multicritères et permettent de traiter plusieurs dimensions en même temps.

Le chapitre est organisé de la manière suivante :



La première partie de ce chapitre décrit les principales méthodes d'évaluation utilisées dans la gestion des déchets. Si quelques travaux tentent de développer ces méthodes pour étudier un problème complexe sous plusieurs dimensions, ces dernières sont généralement des outils d'analyse monodimensionnelle principalement liés à l'environnement ou à l'économie.

La seconde partie présente les méthodes d'analyses multicritères d'aide à la décision. Dans un contexte de développement durable et d'économie circulaire, plusieurs auteurs proposent d'utiliser ces méthodes. Ces dernières s'avèrent efficaces pour accompagner les décideurs opérationnels à conjuguer des impacts économiques, environnementaux, sociaux, ou d'autres dimensions où souvent des critères conflictuels peuvent mener vers des choix opposés.

La troisième partie présente les critères les plus étudiés et pris en considération dans la littérature liée à la gestion des déchets.



## 2.1. LES DIFFERENTS MODELES

La revue de la littérature permettant d'aider à la prise de décision dans le cadre d'une gestion des déchets selon plusieurs dimensions, nous a conduit à plusieurs modèles d'analyses. Comme mentionné dans l'introduction, ces derniers peuvent être classés de différentes façons, en fonction de leurs caractéristiques de fonctionnement ou des dimensions que le modèle analyse. *Chang et al* propose de les classer en deux familles<sup>[53]</sup> (Figure 18) :

- les outils d'évaluation des systèmes,
- les modèles d'ingénierie des systèmes.

LES MODELES D'INGENIERIE DES SYSTEMES							
CBA Cost-Benefit Analysis	FM Forecasting Model	SM Simulation Model	MCDM (Multicriteria Decision Making Methods)				IMS Integrated Modeling System
		MADM Multi Attribute Decision Making	MODM Multi Objective Decision Making				
			NLP nonlinear programming	MIP mixed integer programming	DP dynamic programming	LP linear programming	
LES OUTILS D'ÉVALUATION DES SYSTEMES							
SD Scenario Development	MFA Material Flow Analysis	LCA Life-Cycle Assessment ou Life-Cycle Inventory (LCI)	RA Risk Assessment	EIA Environmental Impact Assessment	SEA Strategic Environmental Assessment	SOEA SocioEconomic Assessment	SA Sustainable Assessment

Figure 18 : Les deux familles de modèles, adapté d'après les travaux *Chang et al*

Les paragraphes suivants expliquent brièvement ces deux familles ainsi que les principales méthodes qui les composent.

### 2.1.1. Les outils d'évaluation des systèmes

Les auteurs ont classé ces méthodologies, permettant d'évaluer un système, selon huit catégories<sup>[44], [54]</sup> (Tableau 9). Celles-ci sont complémentaires entre elles et trouvent des applications dans de nombreux domaines.

Au niveau de la gestion des déchets, les modèles d'évaluation des systèmes sont principalement appliqués depuis les années 1960 à de nombreux déchets, en particulier les déchets ménagers et assimilés. Il s'agit de vérifier que les objectifs socioéconomiques et environnementaux sont respectés. Pour cela, il est demandé aujourd'hui aux décideurs de prendre en compte l'ensemble des aspects techniques et non techniques. Les outils, présentés dans le Tableau 1, permettent de modéliser les conséquences d'un éventuel choix (cf. *Chapitre 1*) sur différents aspects : environnement, économie et social.

Tableau 9 : Les outils d'évaluation des systèmes d'après *Chang et al*

LES OUTILS D'ÉVALUATION DES SYSTEMES	
NOM	DESCRIPTION COURTE
Scenario Development (SD)	Ces méthodes proposent d'étudier un système complexe selon différents scénarios (des alternatives envisageables dans un futur proche) par rapport à des événements, une décision, ou par rapport à la mise en place d'une stratégie afin de connaître les conséquences potentielles.
Material Flow Analysis (MFA)	Material Flow Analysis (MFA), ou Material Flow Accounting, est une méthode qui permet l'évaluation systématique des flux et des stocks de matière dans un système défini (temps et espace). La méthodologie générale se base principalement sur la loi de conservation de la matière.
Life Cycle Assessment or Life Cycle	L'ACV est un processus visant, dans un premier temps, à évaluer les charges environnementales d'un produit, d'un processus ou d'une activité. Il s'agit d'identifier et de quantifier les flux d'énergies et de matières du système étudié, les déchets et les émissions rejetés dans l'environnement. Ensuite, le praticien peut évaluer les

LES OUTILS D'ÉVALUATION DES SYSTEMES	
NOM	DESCRIPTION COURTE
Inventory (LCA or LCI)	différentes possibilités de conception, ou de choix afin d'identifier les opportunités qui conduisent à des améliorations de la performance environnementale.
Risk Assessment (RA)	L'évaluation des risques est un terme général couvrant de nombreux types d'évaluation <sup>[55]</sup> . Dans le contexte de l'analyse d'un système, l'évaluation des risques (ou évaluation des risques environnementaux, ou analyse des risques) peut être définie comme une méthode qui évalue des dommages possibles à un système, à un environnement. Cette évaluation commence par un inventaire des risques liés soit, à une unité opérationnelle soit, à une infrastructure. Il s'agit ensuite d'évaluer l'importance des risques identifiés et leurs conséquences sur un éventuel accident.
Environmental Impact Assessment (EIA)	La méthode EIA est une procédure qui vise à garantir que le processus décisionnel concernant des activités n'a pas d'influence sur l'environnement. Il s'agit d'effectuer un examen des conséquences environnementales (directes et indirectes) d'un projet de développement sur des facteurs physique, biologique, culturel, économique ou de nature sociale <sup>[26]</sup> .
Strategic Environmental Assessment (SEA)	Cette méthode est simplement définie comme une évaluation environnementale d'une action politique, d'une stratégie ou d'un programme. Une étude amont permet, notamment, aux pouvoirs publics de s'assurer qu'un plan ou un programme intègre les considérations environnementales en veillant à ce que ces dernières permettent de promouvoir davantage le développement durable.
Socioeconomic Assessment SoEA)	La méthode propose de ne prendre en considération que des critères non techniques tels que l'emploi, la santé publique, les odeurs, le bruit ou encore le trafic routier.
Sustainable Assessment (SA)	Ce modèle fait référence à l'intégration de différentes méthodologies listées dans ce tableau afin d'obtenir une analyse, une évaluation ou un plan qui aborde plusieurs aspects de la gestion des déchets. L'objet étant d'éclairer la prise de décision ou de connaître l'état actuel d'un système.

Le classement proposé par *Pires, Martinho, et Chang*<sup>[44]</sup> et *Chang, Pires, et Martinho*<sup>[54]</sup> représente la base du classement des différents modèles selon une vision globale. En effet, les travaux d'*Angelakoglou et Gaidajis*<sup>[56]</sup> et de *Finnveden et Moberg*<sup>[57]</sup>, portant sur les méthodologies d'analyse environnementale montrent que les modèles sont à leur tour subdivisés en plusieurs sous-modèles puis en plusieurs méthodes (*Figure 19*).

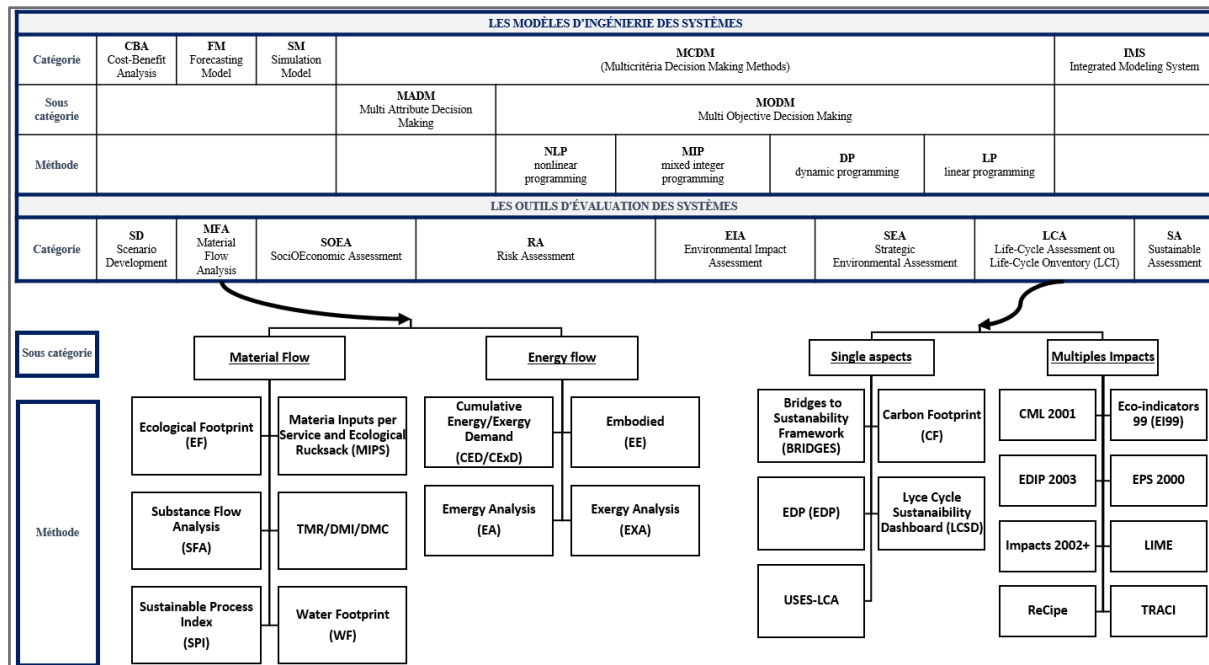


Figure 19 : La diversité des modèles d'analyse environnementale d'après les travaux de Chang et al et d'Angelakoglou et Gaidajis

### 2.1.2. Les modèles d'ingénierie des systèmes

Le *Tableau 10*, ci-après, reprend les différentes méthodes d'ingénierie des systèmes selon *Chang et al*<sup>[54]</sup>. Ces dernières permettent de modéliser et d'analyser un système dans son environnement.

Tableau 10 : Les modèles d'ingénierie des systèmes d'après Chang et al, appliqués aux déchets

LES MODELES D'INGENIERIE DES SYSTEMES	
NOM	DESCRIPTION COURTE
Cost-Benefit Analysis (CBA)	Cette méthode est une technique de modélisation permettant aux décideurs de mesurer les effets positifs et négatifs, sur l'économie, d'un projet ou d'une politique dans lesquels tous les impacts mesurés sont transformés en flux monétaires.
Forecasting Model (FM)	Ce modèle est apparu au début des années 1970 pour aider les décideurs (politiques, opérationnels) à prévoir les flux de déchets des prochaines années (qualitatif et quantitatif).
Simulation Model (SM)	Les modèles de simulation sont définis comme des méthodes utilisant les ordinateurs pour tracer de longues chaînes d'événements continus ou discrets basés sur la relation cause à effet. Elles décrivent les opérations des systèmes complexes afin de faciliter l'étude du comportement dynamique du système déchet.
Optimisation Model (OM)	Les modèles d'optimisation sont des modèles de programmation à objectif unique (Single Objective Programming). Ces modèles visent à rechercher la solution optimale d'un problème de gestion de déchets en fonction de plusieurs contraintes techniques et managériales.
Integrated Modeling System (IMS)	Cette famille regroupe différents types de modèles qui, de par leur nature, présentent des caractéristiques, des échelles et une complexité différente. Dans la plupart des cas, ils permettent d'identifier des impacts induits par l'homme et d'évaluer les conséquences de ces perturbations sur l'environnement. Ces modèles permettent d'intégrer l'ensemble des modèles présentés dans ce tableau.
MultiCriteria Decision Making (MCDM)	Cette famille de méthode MCDM permet de résoudre des problèmes de décision et de planification selon plusieurs critères conflictuels. Il s'agit d'aider le/les décideur(s) dans leur choix d'alternative. Cette famille regroupe deux catégories, les méthodes d'analyse multicritères et les méthodes d'optimisation multicritères.

Ce système peut être considéré comme un ensemble de composants et/ou de sous-systèmes qui interagissent les uns avec les autres<sup>[58]</sup>. Ainsi, dans notre contexte, la gestion des déchets peut être assimilée à un système complexe dans lequel les installations de traitement sont considérées comme des sous-systèmes reliés entre eux, notamment, par des flux de déchets.

De plus, ce système déchet est considéré comme « ouvert », puisqu'il nécessite un apport de matériaux et d'énergie et des capitaux sociaux et économiques provenant de l'extérieur (Figure 20). Ces relations confirment que la gestion des déchets est confrontée à plusieurs dimensions.

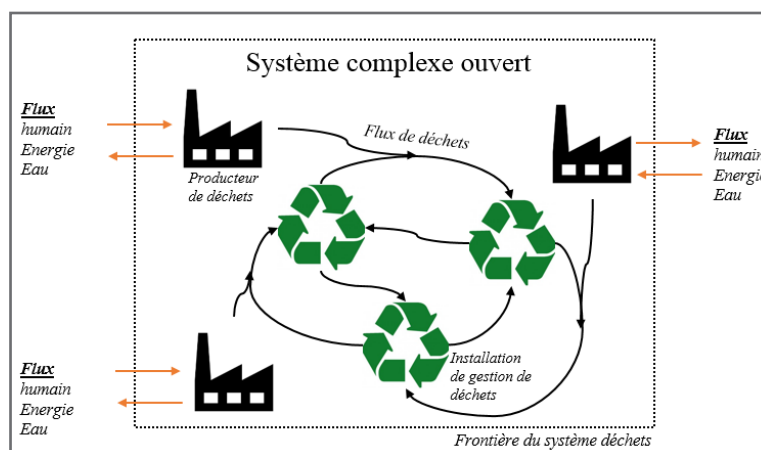


Figure 20 : Un système déchet complexe et ouvert

Ces différents modèles permettent d'analyser, selon les frontières du système choisi, les aspects techniques et non techniques (réglementaires, environnementaux, territoriaux et aussi économiques) afin d'aider les décideurs à avoir une vision globale du fonctionnement du système déchet dans l'objectif de choisir la solution la plus adéquate. Cette solution peut être de différente nature à savoir un choix d'une stratégie à adopter, un choix d'orientation d'un flux de déchets particulier ou un choix concernant la conception et l'implantation d'une nouvelle installation de gestion des déchets sur un territoire.

### 2.1.3. Discussion des différentes méthodologies

Les modèles et les outils d'évaluation énumérés dans les tableaux ci-avant ont été utilisés pour analyser une variété de systèmes et de flux de déchets partout dans le monde. Ces modèles peuvent être appliqués en considérant différents aspects tels que le temps, les différents niveaux du territoire, les aspects techniques, environnementaux, énergétiques, économiques ou sociaux. Néanmoins, la gestion des déchets est un vaste domaine et dans plusieurs cas, les modèles et les outils discutés se spécialisent sur des flux de déchets particuliers tels que les déchets ménagers et assimilés, les boues d'épuration (modèle ORWARE) ou des déchets industriels (modèle MIMES/WASTE). Globalement, les deux classes de modèles apportent une vision, de par leur fonctionnement, différente d'un problème ou d'un système complexe. En effet, les modèles d'ingénierie des systèmes visent à identifier une solution optimale à un problème alors que les modèles d'évaluation proposent d'évaluer différents scénarios. Ainsi, dans la première catégorie, le choix peut être « automatique » puisqu'il est identifié par la méthodologie des méthodes, alors que dans la deuxième classe de modèle, le choix est totalement entre les mains d'un décideur.

Les sections suivantes précisent les deux classes de modèles, les plus couramment utilisées dans la littérature. Il ne s'agit pas d'en détailler le fonctionnement sauf pour celles que nous jugeons pertinentes pour la suite de nos travaux. Le découpage suivant a été retenu pour les présenter :

- les outils d'évaluation des systèmes, qui ne traitent souvent qu'une seule dimension (principalement économique ou environnementale). Il s'agit souvent des méthodes [Analyse de Cycle de Vie \(ACV\)](#), [Material Flow Accounting/Analysis \(MFA\)](#) pour la dimension environnementale et [Life Cycle Costing \(LCC\)](#) pour la dimension économique,
- les méthodes d'analyses multicritères d'aide à la décision qui peuvent être appliquées à plusieurs dimensions. Il s'agit souvent des méthodes [Analytic Hierarchy Process](#), [Promethe](#), [Electre](#)...

**Remarque :** Il n'existe pas de consensus au sein de la communauté scientifique à propos du classement de la méthode [Cost-Benefit Analysis \(CBA\)](#). En effet, des auteurs classent cette méthode comme un modèle d'évaluation des systèmes<sup>[20], [56]</sup> alors que d'autres la positionnent plutôt comme un modèle d'ingénierie<sup>[44], [54]</sup>. Cette discussion se porte également sur la méthode [Material Flow Cost Accounting \(MFCA\)](#)<sup>[56]</sup>.

On peut émettre l'hypothèse que le « non-consensus » de la communauté scientifique dépend de l'intention des auteurs. En effet, s'il s'agit de proposer une solution optimale automatique, les auteurs classent ces méthodes dans les modèles d'ingénierie alors que, s'il s'agit d'évaluer un système afin qu'un décideur humain puisse effectuer un choix alors, les auteurs positionnent ces méthodes comme des modèles d'évaluation des systèmes.

## 2.2. LES MODELES D'EVALUATION DES SYSTEMES

La revue de la littérature montre que la gestion des déchets porte majoritairement sur les dimensions environnementale et économique<sup>[20], [43]</sup>. Ainsi, les premières parties de cette section abordent plus particulièrement les méthodes d'analyse environnementale et notamment, les plus répandues à savoir, l'[ACV](#) et la [MFA](#). Les parties suivantes quant à elles, traiteront des outils économiques : les méthodes [CBA](#), [LCC](#) et [MFCA](#).

### 2.2.1. Les outils et méthodes d'analyses environnementales

Les travaux de *Cobo, Dominguez-Ramos et Irabien*<sup>[43]</sup> et d'*Angelakoglou et Gaidajis*<sup>[56]</sup> indiquent qu'il existe plusieurs outils d'analyse environnementale. Dans le cadre de nos travaux, nous nous sommes particulièrement intéressés aux méthodes les plus discutées et les plus appliquées dans les études portant sur la gestion des déchets<sup>[20], [43], [44], [57]</sup>. L'utilisation d'une méthode ou d'une autre dépend des objectifs<sup>[57]</sup>, du pays d'origine

des auteurs<sup>[44]</sup> et/ou des objets étudiés et des impacts examinés<sup>[57]</sup>. Le *Tableau 11* ci-dessous résume les méthodologies et outils examinés par la littérature scientifique.

*Tableau 11 : Modèles, méthodes et outils examinés par la littérature scientifique pour les analyses environnementales (et dans le cadre d'une gestion de la gestion des déchets)*

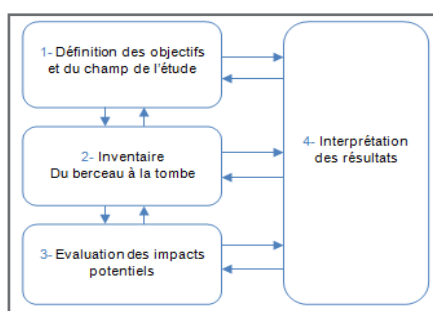
DEMARCHÉ ANALYSE DE CYCLE DE VIE	DÉMARCHÉ MATERIAL FLOW ACCOUNTINGS	DEMARCHÉ « DECHETS – ENERGIE »	AUTRES
Simapro <sup>[20], [59]</sup>	Umberto <sup>[60]</sup>	Martes <sup>[61]</sup>	Strategic Environmental Assessment (SEA)
Gabi <sup>[62]</sup>	Stan <sup>[44]</sup>	Modest <sup>[61]</sup>	
Boustead model <sup>[62]</sup>	SFinX <sup>[44]</sup>	Heat Spot <sup>[61]</sup>	Environmental Management System (EMS)
Open LCA	Dynflow <sup>[44]</sup>	Energy Plan Model <sup>[61]</sup>	
LCA Land <sup>[63]</sup>	IFEU <sup>[64]</sup>	KRAM Model <sup>[61]</sup>	Benchmarking
DEMARCHÉ SUSTAINABLE ASSESSMENT (SA)	Flux <sup>[44]</sup>		Energy Analysis (EA)
ACV — MFA			CBA
ACV — IWM <sup>[65], [66]</sup>			

Plusieurs outils ont été créés, améliorés et discutés pour évaluer les performances environnementales d'un système. Depuis les années 1990, une majorité d'études proposent d'évaluer les impacts environnementaux selon la démarche d'analyse du cycle de vie<sup>[20], [43]</sup>. Cette méthodologie fait consensus au sein de la communauté internationale<sup>[67]</sup> et plusieurs logiciels ont été développés pour faciliter son application<sup>[60], [63], [65]</sup>. Les paragraphes ci-dessous présentent succinctement la démarche générale de la méthode ACV puis listent les principaux enseignements tirés des « ACV déchets ».

### 2.2.1.1. L'Analyse de Cycle de Vie

#### La démarche générale

L'ACV est la méthode d'évaluation des impacts potentiels sur l'environnement d'un produit ou d'un service sur la totalité de son cycle de vie (« du berceau à la tombe »). Elle vient en complément d'approches dites « site », notamment les études d'impact, en apportant une vision plus globale et plus transverse des problématiques environnementales. Le bilan environnemental d'un système repose sur la quantification des flux de matière et d'énergie liés à ce système. Cette quantification se fait sur l'ensemble du cycle de vie, de l'extraction des matériaux au traitement des déchets. La réalisation d'une ACV est régie par une série de normes ISO (14040-14044<sup>[67]</sup>) de guides méthodologiques (ILCD Handbook<sup>[68]</sup>) et se déroule selon les quatre phases présentées sur la *Figure 21* ci-après.



*Figure 21 : Cadre de l'ACV*

La 1<sup>ère</sup> étape consiste à définir les objectifs de l'étude en identifiant le public visé et ses attentes afin de choisir le champ de l'étude adéquat, c'est-à-dire les frontières du système étudié (filères analysées, conditions de fonctionnement, etc.). On définit lors de cette première étape une unité fonctionnelle permettant de caractériser le service rendu par le système. Cette unité fonctionnelle doit être mesurable et additive.

La 2<sup>ème</sup> étape consiste à réaliser l'inventaire des extractions et des émissions du système dans l'environnement rapporté à l'unité fonctionnelle : on liste ainsi l'ensemble des flux matière et énergie, entrants et sortants du système, sur l'ensemble de son cycle de vie, de l'extraction des matières premières (du berceau) à leurs traitements en fin de vie (à la tombe). Les flux considérés sont de deux types :

- les flux directs, générés par le procédé principal de l'étape considérée (par exemple, les rejets de CO<sub>2</sub> pour l'étape de production d'électricité),

- les flux indirects, provenant de filières connexes à celle étudiée (par exemple, les flux liés à la production du béton utilisé dans les centrales électriques).

Une fois cet inventaire réalisé, dans la 3<sup>ème</sup> étape de l'ACV, l'évaluation des impacts vise à traduire les flux quantifiés dans l'inventaire en un nombre réduit d'indicateurs, propres à caractériser les conséquences de ces substances sur l'environnement : effet de serre, acidification, consommation d'eau, eutrophisation, etc. Ces impacts potentiels sont souvent calculés pour un environnement moyen (population, météo, etc.) et non dans des conditions réelles.

Enfin dans une 4<sup>ème</sup> et dernière étape, ces indicateurs sont analysés et interprétés : de nouvelles hypothèses peuvent alors être faites et l'inventaire modifié (démarche itérative). D'après l'ADEME, il existe trois grands domaines d'applications pour les analyses de cycle de vie et l'un d'eux, est l'analyse des filières de traitements des déchets<sup>[50]</sup> qui étudie principalement la partie fin de vie d'un système.

### Discussion de la méthode

L'analyse de cycle de vie est la principale méthodologie utilisée dans les analyses environnementales, mais elle est également caractérisée par de nombreuses limites bien identifiées<sup>[50], [60], [69]</sup>. En effet, les résultats ACV résultent de modèles dont la robustesse n'est pas toujours garantie et les données relativement incertaines. En outre, toutes les modélisations ACV s'appuient sur un jeu d'hypothèses qu'il n'est pas toujours possible de vérifier. De plus, l'ACV ne permet pas d'obtenir de résultats binaires (bon ou mauvais produit/service), mais des résultats variés : dans la plupart des cas, un système peut être meilleur pour certains indicateurs et moins bon pour d'autres. Les conclusions ne vont alors peut-être pas toutes dans le même sens et cela doit être explicitement mis en avant. Ensuite, la modélisation des impacts dus à la distribution spatiale (pollution locale, exposition réelle des écosystèmes et population affectée) et temporelle d'émissions locales et régionales est mal considérée pour le moment dans la méthodologie ACV. Il est évident que la qualité des résultats d'une analyse de cycle de vie dépend fortement de la qualité des données utilisées et des hypothèses réalisées. Enfin, l'ACV ne prend pas, ou difficilement, en compte les aspects économiques, sociaux et territoriaux. L'intégration de ses aspects fait aujourd'hui encore l'objet de développements méthodologiques.

#### 2.2.1.2. L'Analyse de Cycle de Vie Déchets

Les analyses de cycle de vie focalisées sur la partie déchet sont nombreuses<sup>[50], [69]</sup>. La différence entre une analyse de cycle de vie classique et une analyse orientée sur la fin de vie se trouve au niveau des frontières et des étapes prises en compte (*Figure 22*).

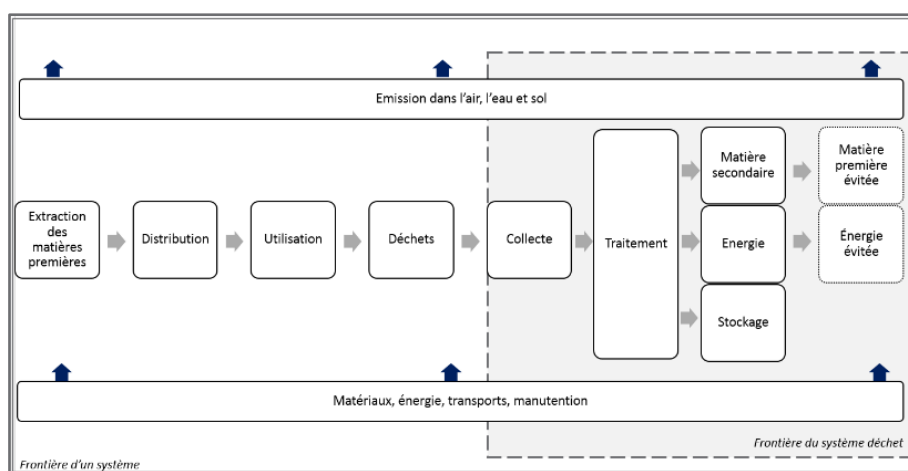


Figure 22 : Frontières et étapes prises en compte dans une ACV déchet

L'objectif de ces études est soit, d'évaluer et de quantifier les impacts environnementaux d'une filière de gestion de déchets soit, de comparer plusieurs filières entre elles afin d'identifier la plus pertinente sur l'aspect environnemental. Ensuite, il existe un grand nombre de publications qui relèvent du développement de



nouveaux logiciels, d'indicateurs ou qui présentent de nouvelles fonctionnalités pour faciliter les études. En dernier lieu, des ACV déchets sont menées au niveau territorial afin d'évaluer les conséquences environnementales et aider à orienter les futures décisions politiques (territoriales) en matière de gestion de déchets.

La grande diversité des analyses de cycle de vie portées sur la fin de vie illustre et met en avant la complexité du système « déchet ». Pour faciliter la compréhension, différentes méthodes et plusieurs outils, basés sur l'analyse de cycle de vie, ont été développés spécialement pour l'étude de la gestion des déchets. Le *Tableau 12*, ci-dessous, présente quelques méthodes et outils les plus cités ou discutés dans la littérature.

*Tableau 12 : Modèles de type cycle de vies spécialisées dans l'étude des déchets*

ACRONYMES	DESCRIPTION	ANNEE	PROVENANCE
Wisard [44], [61], [62], [65], [70]	Waste-Integrated Systems for Assessment of Recovery and Disposal (WISARD) a été développé par la firme Ecobilan en 1994 (Royaume-Uni, France) membre du groupe Price Waterhouse Coopers. Ce logiciel de type ACV permet d'évaluer et de comparer les performances environnementales de différents scénarios de gestion des déchets ménagers. Il est principalement appliqué à la gestion des matières résiduelles. Cet outil évalue, selon la démarche cycle de vie, les impacts environnementaux de la collecte, du tri, du transport des matériaux triés, des procédés de recyclage, de l'incinération, du compostage et du stockage. Le logiciel est disponible en version française et anglaise.	1994	Royaume-Uni & France
IWM2 [44], [57]	IWM-2 est un modèle « d'inventaire du cycle de vie » (ICV) appliqué à la gestion intégrée des matières résiduelles solides. L'outil, édité en 2001, permet de comparer différents scénarios de gestion. Il est inspiré d'un livre intitulé « <i>Integrated Solid Waste Management : A Life Cycle Inventory</i> » qui explique le concept de la gestion intégrée des déchets solides dans une perspective de cycle de vie [71]. Plusieurs cas d'application sont présentés dans ce livre. On retrouve ce type de modèle également sous l'appellation ISMM ( <i>Integrated Solid Waste Management</i> ) [62], [72], [73].	1995 2001	Royaume-Uni (Procter & Camble)
WARM [62]	Waste Reduction Model (WARM) est un outil pour aider à la planification dans la gestion de déchets solides dans l'objectif de réduire les émissions de gaz à effet de serre. Cet outil a été financé par l'United States Environmental Protection Agency (US EPA).	ND	USA (EPA)
ARES [60]	Pas de détails disponibles. Outil développé en Allemagne entre 1998 et 2000.	1998 2000	Allemagne
MSWI	Le « modèle modulaire MSWI » a été développé par GreenDeltaT. C'est un outil spécifiquement conçu pour les usines d'incinération des déchets solides. Le logiciel calcule les entrants et sortants à l'aide de plusieurs fichiers Excel.	1997 2003	Allemagne
Orware [60], [65], [74]– [77]	Le modèle ORWARE (Organic Waste Research) a initialement été développé, en 2011, pour les déchets d'origine organique. Il comprend plusieurs modules visant l'évaluation des émissions issues d'options de gestion comme le transport, le compostage, l'incinération, la digestion anaérobie et l'enfouissement. Une seconde version, développée pour le Swedish Waste Research Council par le Swedish Royal Institute of Environment, permet d'évaluer les traitements des déchets en général.	2001	Suède
Easewaste [20], [52], [63]– [65], [78]	EASEWASTE est un logiciel développé par la Denmark Technology University (DTU). Ce dernier permet de comparer différentes stratégies de gestion et différentes méthodes de traitement des matières résiduelles selon plusieurs procédés. Une formation auprès des concepteurs du modèle est obligatoire afin d'acquérir le logiciel [79].	ND	L'université Technique du Danemark
Wamps [63], [80], [81]	Cet outil propose une évaluation, selon la démarche cycle de vie, des conséquences environnementales des différents systèmes de gestion des déchets (scénarios). Il est principalement utilisé pour la planification de la gestion des déchets solides municipaux.	2007	Suède
Awast [70]	Le simulateur AWAST est un outil dédié à gestion des déchets municipaux. Celui-ci permet notamment de simuler l'influence de la composition des déchets et/ou des caractéristiques du procédé de traitement sur la performance globale d'un système de gestion des déchets.	ND	ND
Wrate [20], [44], [65]	WRATE est un outil de type ACV permettant de comparer différents scénarios de gestion des matières résiduelles solides municipales. Cet outil a été créé par l'agence environnementale du Royaume-Uni en 2006.	2001	L'UK Environmental Agency
Wasted [44]	Le modèle WASTED permet une vue d'ensemble des impacts environnementaux des matières résiduelles solides municipales. Il prend en compte la collecte, la récupération, le compostage, la récupération d'énergie et l'enfouissement.	ND	Canada

ACRONYMES	DESCRIPTION	ANNEE	PROVENANCE
	WASTED est un outil conçu pour aider les décideurs de déchets à évaluer différents des scénarios envisagés afin d'améliorer la performance environnementale.		
SSWMSS [63], [65]	Strategic Waste Management Support Software (SSWMSS) est un outil d'origine japonaise. Celui-ci permet d'aider les décideurs dans la planification de gestion des déchets solides. Sa construction se base sur la démarche analyse de cycle de vie déchets et sur le life cycle costing.	ND	Japon
D-Mowing [82]	Cet outil est un modèle dynamique de gestion des déchets organiques pour la province de Québec au Canada. Celui-ci permet d'étudier des scénarios (passés ou futurs) selon les dimensions du développement durable.	ND	Canada
E-impacttm	e-IMPACT™ a été développé par Eco-Emballages. Il s'agit d'une version simplifiée du logiciel WISARD. Celle-ci n'intègre pas les méthodes recommandées (ISO) pour l'analyse d'impact du cycle de vie.	ND	France (Éco-Emballages)
Holiwast [63]	Holiwast vise à fournir une comparaison pluridisciplinaire (environnementale, économique, sociale) des différentes technologies de gestion des déchets.	2004 2007	Europe
MSW-DST [20], [65]	Le logiciel DST a été conçu par la firme RTI-International (États-Unis) afin de modéliser les émissions associées à la gestion des déchets municipaux. Cet outil tient compte des émissions provenant de la collecte, du transport, des installations de valorisation des matériaux, des plateformes de collecte, des installations de compostage, de combustion ou les installations d'enfouissement sanitaire. Il permet également de déterminer la stratégie la plus économique et la moins énergivore.	1994	USA (RTI-International)
Mimes/waste [62]	Le modèle MIMES/WASTE est un modèle d'optimisation informatisé pour les systèmes de gestion des déchets municipaux ou régionaux. Il a été développé pour le Swedish Waste Research Council et le Swedish National Board for Industrial and Technical Development de l'Université Chalmers.	1994 1996	Suède
IWMMM	Integrated Waste Management Model for Municipalities (IWMMM) a été développé par l'Environment and Plastics Industry Council (EPIC) et la Corporations Supporting Recycling (CSR). Ils ont été mandatés par l'Université de Waterloo (Canada) afin de développer des outils permettant d'évaluer les impacts environnementaux et économiques liés à la gestion des matières résiduelles municipales. Le but de ce modèle est de fournir aux municipalités canadiennes une aide pour mesurer la performance environnementale et économique de leur système de gestion des déchets (présent ou futur). Le modèle IWMMM est composé de deux outils. Le premier est un modèle d'analyse environnementale fondé sur l'approche du cycle de vie et le second, un modèle d'analyse économique. <sup>[79]</sup>	ND	Canada

On remarque que tous les modèles, mis à part **SSWMSS**, ont été conçus en Europe ou en Amérique du Nord entre les années 1994 et 2007. On peut émettre l'hypothèse que cet intérêt de développer des outils spécialisés dans la gestion des déchets est lié à l'accord international sur la réduction des gaz à effets de serre (protocole de Kyoto) de 1995 et au développement de la pensée cycle de vie.

Ensuite, on remarque que la majorité de ces outils ne concernent qu'un flux particulier de déchets et le plus souvent, les déchets ménagers et assimilés ou des déchets plus spécifiques comme les déchets organiques (**ORWARE** par exemple). Nous rappelons que selon les chiffres présentés dans le chapitre contexte et enjeux (cf. *Chapitre 1*), ce ne sont pas les flux les plus importants.

Enfin, deux d'entre eux se distinguent par leur capacité à prendre en charge des aspects économiques en plus des aspects environnementaux. Les modèles **D-Mowing** et **Holiwast** permettent quant à eux d'évaluer les dimensions du développement durable (économique, sociale et environnementale). Aujourd'hui, il est difficile de savoir si ces outils sont encore utilisés dans les organisations qui les ont développés.

A l'instar de la méthode ACV, la méthode présentée dans le paragraphe suivant est basée sur un inventaire des flux entrants et sortants du système étudié.



### 2.2.1.3. La démarche Material Flow Accounting/Analysis.

#### La démarche générale

Cette démarche regroupe un ensemble de méthodes<sup>[57]</sup> qui permettent le suivi et le pilotage des politiques publiques territoriales<sup>[31]</sup>. Elle propose de recenser et de comptabiliser l'intégralité des flux de matières et d'énergie qui entrent et sortent d'un territoire (ou d'un site industriel) en se basant sur la conservation de la masse (Figure 23).

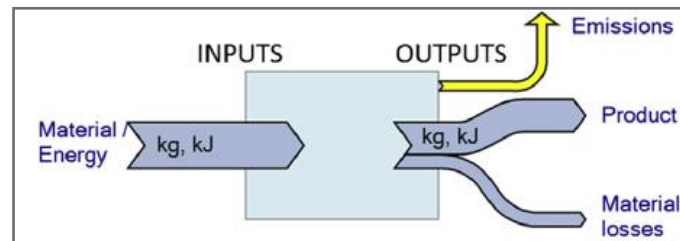


Figure 23 : Représentation graphique de la démarche MFA d'après Schmidt

Cet outil permet de fournir de nombreuses informations (flux en entrée et en sortie) sur les territoires<sup>[83]</sup> et d'identifier les principaux enjeux (économiques ou environnementaux)<sup>[84]</sup> par rapport aux différents flux étudiés. À l'international, les indicateurs de la MFA sont notamment utilisés par le Japon<sup>[84]</sup> pour sa planification nationale dans le suivi des taux de recyclage et de traitement des déchets. En Chine, on note également une étroite proximité entre cette méthodologie et les indicateurs d'économie circulaire que le pays a mis en place<sup>[12], [85]</sup>. Au niveau français, la MFA est principalement utilisée à l'échelle nationale et régionale<sup>[31]</sup> et départementale<sup>[31], [84]</sup>. Néanmoins, l'ADEME a développé de nombreuses études de cas à l'échelle « entreprise » pour encourager le développement de l'utilisation de cette méthode.

#### L'utilisation dans la gestion des déchets

Dans la littérature scientifique, cette méthodologie a été de nombreuses fois discutée et utilisée dans les analyses de gestion de déchets. Il s'agit de connaître les flux d'un territoire particulier<sup>[86]</sup>, d'identifier les substances présentes dans les flux<sup>[86]</sup> ou encore de coupler la méthode à d'autres méthodologies environnementales<sup>[87], [88]</sup> ou économiques<sup>[87], [89]–[92]</sup>.

#### Discussion de la méthode

Cette méthode, utilisée dans de nombreux travaux<sup>[31]</sup>, permet de connaître précisément les différents flux entrants et sortants d'un territoire ou d'une organisation. Toutefois, elle ne permet pas d'évaluer la circulation des flux à l'intérieur du système étudié comme l'eau et l'électricité, car ils sont difficilement quantifiables.

Cette méthode repose sur l'utilisation d'un grand nombre de données, qui peuvent parfois être difficiles à mobiliser en raison de leur confidentialité ou de leur non-disponibilité. La méthode est également, plus adaptée à un périmètre géographique national ou régional, puisqu'au niveau du département ou à un niveau plus local il existe une forte incertitude liée aux données<sup>[31]</sup>. En outre, les données statistiques sont plus faciles à obtenir d'un point de vue national ou régional. Néanmoins, lorsqu'une organisation utilise cette méthode pour ses besoins personnels, les données sur les flux sont fondées sur des campagnes de mesure garantissant leur fiabilité. Enfin, cette méthodologie n'est pas considérée comme une méthode d'évaluation des impacts environnementaux, mais plutôt comme une méthode permettant d'expliquer les caractéristiques d'un territoire ou d'obtenir des données sur des flux territoriaux.

## 2.2.2. Les outils et méthodes d'analyses économiques

Un examen des travaux de la littérature indique qu'il existe plusieurs méthodes permettant d'effectuer des analyses économiques<sup>[55]</sup>. D'une manière générale, leur principal objectif est d'apporter une aide à la décision

sur le plan économique<sup>[93]</sup>. Le *Tableau 13* ci-dessous propose un résumé des principaux outils d'évaluation économique.

*Tableau 13 : Les principales méthodes d'analyse sociétale et économique*

NOM	DESCRIPTIFS
Total Cost of Ownership	Le Total Cost of Ownership (TCO) est un outil d'évaluation d'achat dont l'objectif est de quantifier le coût réel d'acquisition d'un bien ou d'un service auprès d'un fournisseur particulier <sup>[94]</sup> .
Activity Based Costing et Time-Driven Activity Based Costing	L'Activity Based Costing (ABC) est une méthode d'allocation qui associe les coûts aux activités principales d'une organisation (entreprise, association). L'approche cherche à attribuer des coûts aux produits ou services en fonction des ressources consommées par poste. Ainsi, cette méthode identifie les processus requis au bon fonctionnement de l'organisation et associe les ressources économiques nécessaires pour garantir le fonctionnement des activités <sup>[95]</sup> .
Material Flow Cost Accounting (MFCA)	Le Material Flow Cost Accounting (MFCA) est un outil de comptabilité et de gestion qui cherche à aider les organisations à mieux comprendre les conséquences environnementales et financières potentielles de l'utilisation de leurs matériaux et de leurs pratiques énergétiques <sup>[92]</sup> , <sup>[96]–[98]</sup> .
Social Life Cycle Assessment	Le Social Life Cycle Assessment (S-LCA) est une technique d'évaluation des impacts sociaux potentiels d'un produit ou d'un système <sup>[99]</sup> .
Life Cycle Sustainability Assessment	Le Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA) est une approche qui intègre les trois dimensions du développement durable en combinant les trois méthodes d'évaluation du cycle de vie : le LCA environnemental (E-LCA), le Life Cycle Costing (LCC) et le LCA social (S-LCA) <sup>[100]</sup> .
Full Cost Accounting	Le Full Cost Accounting (FCA) n'est pas véritablement une méthodologie à part entière. Il s'agit plutôt d'un concept qui définit un ensemble de méthodes de comptabilité et de gestion qui cherchent à intégrer l'ensemble des coûts économiques et environnementaux d'un produit ou d'un système tout au long du cycle de vie <sup>[101]</sup> .
Cost-Benefit Analysis (CBA)	Le Cost-Benefit Analysis est une méthode d'analyse utilisée pour juger les avantages ou désavantages d'une décision en estimant ses coûts et ses bénéfices afin d'évaluer la variation de bien-être social qu'elle génère <sup>[102]</sup> . Tous les avantages et désavantages sont convertis en unités monétaires <sup>[20]</sup> .
Life Cycle Costing	Le LCC est un outil économique qui cherche à évaluer le coût total du cycle de vie d'un bien ou d'un système (généralement d'un projet ou un procédé). Cette approche vise à calculer de manière anticipée et dans un horizon temporel défini tous les coûts générés par le bien à chaque étape de son cycle de vie <sup>[87]</sup> , <sup>[93]</sup> .

Ce *Tableau 13* ci-dessus n'est, bien sûr, pas exhaustif. Il existe d'autres méthodes et outils d'analyses économiques plus ou moins traités dans la littérature :

- NatWaste<sup>[61]</sup>,
- Eco EFF<sup>[103]</sup>,
- Mines Waste<sup>[104]</sup>,
- CEA<sup>[20]</sup>,

Les méthodes d'analyses économiques les plus utilisées dans le cadre de la gestion des déchets sont les méthodes **Life Cycle Costing (LCC)**, **Cost Benefits Analysis (CBA)**, **Material Flow Cost Accounting (MFCA)**. Nous proposons dans les paragraphes suivants, une brève description de ces trois méthodes, de leur utilisation pour la gestion des déchets et une discussion sur leurs avantages et inconvénients.

### 2.2.2.1. Le Life Cycle Costing (LCC)

Le **Life Cycle Costing (LCC)** est un outil économique qui cherche à évaluer le coût total du cycle de vie d'un bien ou d'un système (projet ou un service). Cette approche propose d'apprécier tous les coûts générés par le bien (ou le service) à chaque étape de son cycle de vie<sup>[100]</sup>. Les principales applications de cette approche concernent particulièrement des biens ou des systèmes qui génèrent des coûts significatifs d'utilisation, de maintenance et/ou de fin de vie. En outre, cette démarche est surtout mise en œuvre dans le domaine du bâtiment, de machines industrielles, de véhicules et d'autres biens en lien avec de forts investissements. Aujourd'hui, cette méthode est bien établie et fait l'objet de nombreuses lignes directrices et références, particulièrement dans le secteur du bâtiment (cf. *§annexe 2.1*).

## La démarche générale

En synthétisant les différents concepts du LCC, *Kawauchi et Rausand*<sup>[105]</sup> proposent de structurer le LCC en six étapes (*Figure 24*).



*Figure 24 : Les étapes du LCC d'après Kawauchi et Rausand*

Ainsi, le coût du cycle de vie (résultat final de la démarche LCC) est la somme de tous les coûts qui sont générés par l'objet de l'étude (produit ou service) depuis sa conception jusqu'à la fin de vie. L'enjeu est donc de définir correctement le périmètre des coûts à prendre en compte. En effet, il n'est pas nécessairement obligatoire d'étudier la totalité du cycle de vie et dans ce cas, la démarche peut être utilisée pour étudier une partie du cycle de vie. Enfin, le périmètre de l'étude peut également être étendu pour inclure des coûts économiques (externes) et des externalités liées aux impacts environnementaux et sociaux<sup>[106]</sup>. En effet, en fonction des objectifs et de la portée des études, certains aspects non économiques peuvent être inclus dans l'analyse. Ainsi, on distingue trois domaines d'application du LCC dans la littérature<sup>[106]–[108]</sup> :

- économique (Le Life Cycle Costing « conventionnel » (LCC),
- environnemental (Environnemental LCC),
- social (Societal LCC),

Il existe très peu d'études couplant la démarche LCC et la démarche ACV dans la littérature<sup>[109], [110]</sup> puisqu'il est généralement difficile d'avoir un périmètre d'étude similaire aux deux démarches<sup>[106]</sup>. Il est possible de classer les études couplées en deux catégories (*Tableau 14*).

*Tableau 14 : Les deux catégories d'études dans les démarches de combinaison LCC et LCA*

COMBINAISON DES DEMARCHES LCC ET LCA DANS LA MEME STRUCTURE DE CALCUL	COMBINAISON DES DEMARCHES LCC ET LCA EN PARALLELE
Dans cette application, les procédés établis dans un modèle ACV ne sont pas, uniquement, associés aux flux physiques, mais également à leurs coûts respectifs. Les procédés d'un modèle ACV donné sont alors définis en termes physiques (kg, kWh...) et en termes monétaires.	Dans ce cas de figure, les deux méthodes sont mises en œuvre de façon parallèle, mais indépendante : le E-LCC couvre les coûts internes et les coûts environnementaux externes associés aux externalités environnementales prévues d'être internalisées. L'ACV couvre le reste des impacts environnementaux.
EXEMPLE D'ETUDES	
[100]	[111], [112]

## L'utilisation dans la gestion des déchets

La littérature scientifique traitant les aspects économiques par la démarche de Life Cycle Costing aborde la gestion des déchets de deux façons principales<sup>[106]</sup> :

- des études économiques propres à un déchet spécifique,
- des études économiques liées à la gestion des déchets en général.

Dans l'ensemble, ce sont principalement les déchets ménagers qui servent de support aux différentes études. En effet, cette catégorie de déchets permet aux auteurs de discuter des différentes possibilités méthodologiques grâce à la grande variété de déchets composant les déchets ménagers et assimilés et des différentes solutions de traitement. De plus, le cas des déchets ménagers et assimilés implique un nombre d'acteurs très important avec une répartition des coûts (coût aidé, coût technique) très particulière en fonction du territoire étudié. Ces

études sont facilitées via la bonne connaissance des coûts puisque la gestion des déchets par les municipalités et les syndicats font l'objet de contrats réguliers et d'appels d'offres publiques.

### Discussion de la méthode

La démarche Life Cycle Costing est une démarche intéressante pour étudier les coûts, mais cet outil est très libre d'utilisation puisque cette méthode n'a pour le moment pas de cadre normatif (sauf dans les domaines de la défense et du bâtiment). En effet, l'approche adoptée, le périmètre de coûts pris en compte, les méthodes d'allocation et donc, in fine, les résultats des LCC sont très dépendants des choix spécifiques des praticiens. Néanmoins, ces derniers peuvent s'appuyer sur les documents directeurs (cf. *annexe 2.1*) et les adapter à leur contexte.

Aujourd'hui, il n'existe pas de base de données dédiée à la pratique du LCC, contrairement aux bases de données environnementales (Ecoinvent, GaBi, etc...). Cette situation s'explique par la variabilité temporelle et spatiale des données économiques et la confidentialité des coûts industriels. Enfin, les auteurs montrent qu'il n'est pas aisé de coupler la démarche LCC avec la démarche LCA, car les frontières du système et les unités d'analyse pour l'étude d'un même objet peuvent être différentes entre les deux méthodes<sup>[106]</sup>. Il est alors recommandé aux praticiens de définir clairement les deux périmètres dès le début de la modélisation, afin de pouvoir interpréter de manière correcte les résultats.

#### 2.2.2.2. Le Cost Benefits Analysis (CBA)

### La démarche générale

La démarche **Cost-Benefit Analysis** est une méthode d'analyse qui est idéale pour juger des avantages et des inconvénients d'une décision de gestion (sociétale). Elle propose d'estimer les coûts et les bénéfices d'une décision à partir d'une évaluation du bien-être social qu'elle génère. Tous les avantages sont convertis en unité monétaire afin de faciliter la prise de décision portant principalement sur des projets d'investissement ou des stratégies. Il s'agit ensuite, pour le décideur, de retenir l'option pour laquelle les bénéfices sont supérieurs aux coûts<sup>[113]</sup> (d'un point de vue sociétal). Étant donné que l'objectif de cette méthode consiste à estimer l'impact global d'une décision sur l'ensemble du périmètre analysé concerné par le projet, celui-ci peut également inclure des aspects environnementaux et économiques<sup>[120]</sup> à la condition que les différentes données soient transformées en valeurs monétaires<sup>[114]</sup>. De manière générale, la démarche **Cost-Benefit Analysis** cherche à déterminer si :

- la proposition fournit un bénéfice net au périmètre étudié,
- le projet, le programme ou la réglementation doit être mis en œuvre,
- le maintien d'un projet ou d'un programme existant est pertinent,
- le choix d'un projet, parmi plusieurs projets concurrents, est pertinent.

### L'utilisation dans la gestion des déchets

Dans le cadre de la gestion des déchets, cette méthode est surtout utilisée (selon la revue de la littérature) pour évaluer les aspects économiques (60 %), sociaux (33 %) puis environnementaux (7 %)<sup>[20]</sup>. La difficulté d'obtention des données économiques est mise en évidence dans les études puisque 77 % d'entre elles étudient la dimension économique au niveau macro<sup>[20]</sup> alors que les objets d'études concernent davantage des filières bien identifiées qui nécessitent des données plus précises (*Tableau 15*).

Tableau 15 : Objet d'études lors d'une démarche CBA — Adapté d'après Allesh et Brunner

	ÉTUDES DES DIFFÉRENTS TRAITEMENTS	ÉTUDE D'UN TRAITEMENT PARTICULIER	ÉTUDE DE LA COLLECTE DES DÉCHETS	ÉTUDE DU PLAN DE GESTION DES DÉCHETS	ÉTUDE DU SYSTÈME DE MANAGEMENT DE DÉCHET	ÉTUDE DE LA PRÉVENTION DE PRODUCTION DES DÉCHETS	ÉTUDE SUR LE RECYCLAGE DES DÉCHETS
CBA	0 %	44 %	33 %	0 %	11 %	0 %	11 %

## Discussion de la méthode

La démarche **Cost-Benefit Analysis** est difficile à mettre en place, car les facteurs sociaux et/ou les impacts environnementaux sont difficilement quantifiables durablement sur un point de vue monétaire<sup>[114]</sup>.

### 2.2.2.3. Le Material Flow Cost Accounting (MFCA)

Le **Material Flow Cost Accounting** (MFCA) est un outil de comptabilité et de gestion qui cherche à aider les organisations et les décideurs à mieux comprendre les conséquences environnementales et financières potentielles des flux de matières et d'énergies par rapport à des aspects techniques ou industriels<sup>[115]</sup>.

#### La démarche générale

L'outil MFCA est sur le plan méthodologique similaire à la méthode **MFA** (cf. §2.2.1.3), puisque les flux et les stocks de matériaux au sein d'une organisation sont tracés et quantifiés dans les unités physiques (généralement masse ou volume). Ensuite, il s'agit d'associer les coûts aux flux de matières (déchets et produits résiduels inclus) et de les évaluer<sup>[116]</sup>.

La démarche **Material Flow Cost Accounting** (MFCA) propose de diviser les coûts de production au sein d'une entreprise en trois catégories<sup>[117]</sup> :

- les coûts liés aux matériaux,
- les coûts liés au fonctionnement du système,
- les coûts liés à la livraison et à l'élimination de déchets.

Les coûts des matériaux sont associés à l'achat des matières premières, les coûts du système correspondent aux coûts liés au transport de matériaux au sein de l'entreprise et à la main d'œuvre. Les frais de livraison et d'élimination se rapportent aux coûts de transport hors de l'entreprise et comprennent les coûts d'emballage, du carburant des véhicules et les frais d'élimination des déchets.

## Discussion de la méthode

La démarche MFCA est l'une des nombreuses méthodes de comptabilité et de gestion. Contrairement aux méthodes traditionnelles d'analyses des coûts, la MFCA examine les flux de matériaux et les coûts associés aux produits et aux pertes. En effet, dans le cas de pertes matérielles, la démarche ne vise pas seulement à observer les coûts d'élimination des pertes, mais propose d'étudier toutes les ressources économiques qui ont été dépensées en lien avec leur gestion. En résumé, elle propose de lier les données physiques (masse, volume) avec les données économiques. Les décideurs opérationnels, qui habituellement se concentrent principalement sur la diminution des coûts par une réduction de la quantité de matériaux et d'énergies consommées visualisent également, leurs impacts sur l'environnement. En effet, les matériaux et les énergies sont mieux utilisés, ce qui induit que les flux de déchets qui pèsent sur l'environnement sont réduits. En conséquence, des avantages environnementaux sont réalisés même si ce n'est pas une intention volontaire de l'entreprise ou de l'organisation<sup>[117]</sup>.

La démarche MFCA permet donc le suivi environnemental à partir d'une étude économique des organisations. Cependant, la méthode ne permet de traiter que les aspects quantitatifs et la qualité des données à utiliser (économiques, techniques et environnementales) a une grande importance.

Les parties suivantes décrivent la deuxième famille de méthodes, les méthodes d'analyse multicritères d'aide à la décision. Pour rappel, ces dernières s'avèrent efficaces, contrairement aux méthodes de la classe présentée précédemment (plutôt monodimensionnelles), pour accompagner les décideurs opérationnels à conjuguer des impacts de différentes dimensions.

## 2.3. LES METHODES D'ANALYSE MULTICRITERES D'AIDE A LA DÉCISION

### 2.3.1. Les méthodes MADM et MODM

Au niveau des modèles multicritères d'aide à la décision, on distingue les méthodes d'analyse multicritères (**Multi Attribute Decision Making - MADM**) des méthodes d'optimisation multicritères (**Multi Objective Decision Making - MODM**) en fonction du nombre d'alternatives étudiées<sup>[53], [118], [119]</sup>. En effet, pour l'analyse multicritères, les alternatives (les différentes solutions) sont en petit nombre et leurs positions sur les échelles d'évaluation sont connues tandis que, dans les problèmes d'optimisation multicritères l'ensemble des alternatives est défini par des contraintes et les alternatives peuvent donc être en nombre infini. Le *Tableau 16* ci-dessous, adapté des travaux de *Sabaei, Erkoyuncu, et Roy* présente les différences entre les deux familles sur les paramètres clés<sup>[118]</sup>.

Tableau 16 : Comparaison entre les méthodes MADM et MODM

	MADM	MODM
Critères	Définissent les installations	Sont les objectifs (Soit à minimiser soit maximiser)
Objectif	Clair et connu : choisir une alternative parmi les solutions proposées	Dépend de l'étude (Choisir ou créer une alternative, un scénario)
Les alternatives	En nombre fini et elles sont connues	En nombre potentiellement infini et inconnu
Indépendance	Indépendance des critères pour l'évaluation	Interaction entre les critères (Via les fonctions objectives)

Dans notre contexte de gestion des déchets, nous avons mis l'accent sur la description des méthodes d'analyse multicritères (c'est-à-dire la catégorie MADM) puisque les gestionnaires opérationnels sont confrontés à un nombre fini et connu d'alternatives pour la gestion des déchets industriels.

L'utilisation des méthodes d'analyses multicritères d'aide à la décision dans les études portant sur la gestion des déchets a débuté vers 1980 où quand par exemple, *Saaty et Gholmnezhad* ont publié le premier article portant sur l'analyse de scénarios pour la gestion de déchets nucléaires à l'aide de la méthode **Analytic Hierarchy Process**<sup>[120]</sup> (**AHP**). Aujourd'hui, on distingue deux grandes familles de méthodes d'analyse pour l'aide à la décision multicritères (*Figure 25*) :

- les méthodes d'agrégation totale, dites méthodes de l'école « américaine »,
- les méthodes d'agrégation partielle ou de surclassement, dites des écoles « française et belge ».

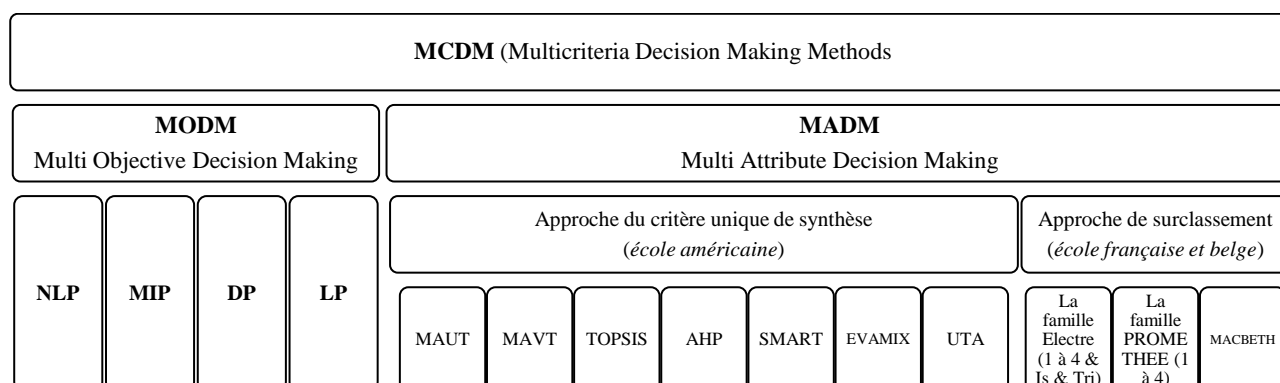


Figure 25 : Les différents modèles multicritères (non exhaustif)

Les parties ci-après proposent une courte description et une comparaison des deux approches.



### 2.3.1.1. Les méthodes d'inspiration américaine

Ces méthodes proposent une synthèse globale des performances sous la forme d'une note d'utilité globale (agrégation totale). Ainsi, les différents critères formant le système d'évaluation pour l'aide à la décision sont réduits en un seul résultat quantitatif. C'est la façon d'effectuer cette agrégation qui différencie les méthodes de cette classe. Parmi les approches les plus représentatives des méthodes d'agrégation totale, on trouve les méthodes **Multi-Attribute utility Theory (MAUT)**, **TOPSIS**, **EVAMIX**, **SMART** et **AHP**. Une présentation détaillée du fonctionnement de quelques méthodes est disponible en *annexe 2.2*.

### 2.3.1.2. Les méthodes d'inspiration française et belge

La seconde classe de méthodes multicritères d'aide à la décision correspond à la méthodologie d'agrégation partielle. Celle-ci consiste à établir une relation de préférence entre les actions considérées. Pour cela, il s'agit de considérer d'une part, les arguments en faveur d'une solution plutôt qu'une autre et d'autre part, les raisons essentielles qui contredisent fortement cette proposition.

Il existe deux grandes familles de méthodes de « surclassement » :

- La famille **ELECTRE** (pour **EL**imination Et **Choix** Traduisant la **RE**alité), fondée par Bernard Roy.
- La famille **PROMETHEE** (pour **P**reference **R**anking **O**rganization **M**ETHOD for **E**nrichment of **E**valuations), fondée par *P. Brans, J.P. Vincke et B. Mareschal*.

Les deux familles suivent des principes proches, à notre échelle de description, où les différences découlent principalement dans la manière de formaliser et d'exploiter le « surclassement ». Il existe également la méthode **Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation TecHnique (MACBETH)**. Quelques-unes d'entre elles sont présentées en *annexe 2.3*.

#### **Les principales différences**

L'application des méthodes d'analyses multicritères (MADM) nécessite deux opérations : **une opération d'agrégation et une opération de comparaison**. L'ordre dans lequel sont effectuées ces opérations n'est pas le même pour toutes les méthodes multicritères et il permet de distinguer les deux approches présentées précédemment.

Les méthodes visant à une approche du critère unique de synthèse (de classe américaine) proposent de comparer les alternatives puis d'agréger les préférences (approche par agrégation totale) afin d'obtenir un score unique de synthèse alors que les méthodes proposant une approche de surclassement (de classe française) proposent d'abord d'agréger les préférences afin d'obtenir un classement puis de comparer les alternatives (approche par agrégation partielle).

Une distinction entre les deux approches est également présente au niveau de la représentation des résultats. En effet, les méthodes visant à obtenir un surclassement de synthèse (famille **ELECTRE** et **PROMETHEE** par exemple) introduisent la notion d'incomparabilité, via un seuil d'indifférence, dès le début de la méthodologie. En conséquence, deux solutions peuvent ne pas pouvoir être comparées (par exemple, les solutions C et D de la *Figure 26*) et ainsi ne pas pouvoir aider un décideur dans son choix d'orientation.

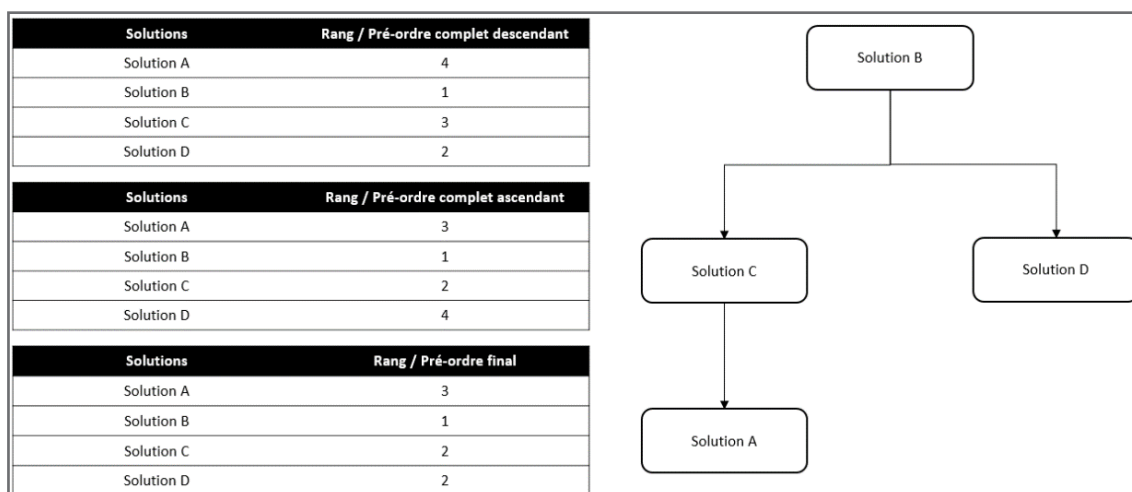


Figure 26 : Exemple d'un résultat avec ELECTRE III

Dans cet exemple (Figure 26), la solution B est surclassée par toutes les solutions (C, D et A). Les solutions C et D surclassent toutes les deux la solution B. Les solutions C et D sont incomparables. Enfin, la solution A surclasse les solutions B et C.

Les méthodes « américaines » traitent cette notion différemment puisque les solutions ne sont pas considérées comme « incomparables », mais plutôt comme égales (la notion d'incomparabilité des solutions apparaît pas dans la méthodologie de construction de ces méthodes). Les alternatives sont alors semblables si elles obtiennent le même score unique de synthèse, mais là encore il est souvent possible de les différencier via, une analyse approfondie critère par critère (en fonction de la transparence des méthodes). En effet, il est très rare que des solutions soient égales pour les mêmes raisons.

Enfin, quelques méthodes de classe américaine peuvent également répondre à la problématique de rangement des solutions puisque l'exploitation du score unique de synthèse permet de classer les solutions selon un ordre croissant ou décroissant.

### 2.3.1.3. Discussion des méthodes d'analyses multicritères d'aide à la décision

Les méthodes d'analyse multicritères sont des outils d'aide à la décision développés depuis les années 1960/1970. Il existe de nombreuses autres méthodes en plus de celles qui ont été présentées. Elles sont à ce jour, en fonction du contexte, de l'objet d'analyse ou des objectifs de l'étude, plus ou moins traitées dans la littérature. Les méthodes multicritères ont des constructions et/ou des finalités différentes et en conséquence, des limites et des avantages qui leur sont propres. Il est difficile de classer des spécificités de construction comme un avantage ou un inconvénient, car cela dépend des objectifs et de la finalité de l'objet de l'étude. Ainsi, le Tableau 17 suivant, extrait de l'annexe 2.4, permet de tracer les principales caractéristiques des méthodes multicritères d'aide à la décision identifiées suite à la revue de la littérature.

Tableau 17 : Les principales caractéristiques de quelques méthodes multicritères (extrait)

NOM DE LA METHODE	CARACTERISTIQUES
AHP	Structure hiérarchique et structure hiérarchique incomplète <sup>[121], [122]</sup> Evolutive <sup>[123]</sup> Échelle sémantique pour exprimer les préférences <sup>[121], [122]</sup> Facile d'utilisation <sup>[123]</sup> Un grand nombre d'éléments entraîne une augmentation du nombre de comparaisons à effectuer <sup>[121], [122], [124]</sup> Attention à l'interdépendance des critères et des solutions comparées <sup>[121], [123]</sup> La démarche est transparente et claire. Elle permet d'éviter les incohérences et les polémiques lors de la définition des poids <sup>[125]</sup> Prend en compte des critères qualitatifs et quantitatifs <sup>[118]</sup>
PROMETHEE 1	Construit une relation de surclassement traduisant une intensité de préférence <sup>[122]</sup>



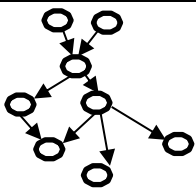
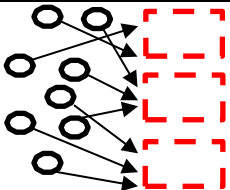
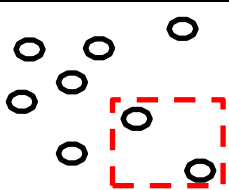
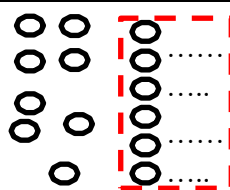
NOM DE LA METHODE	CARACTERISTIQUES
	Prend en compte des critères quantitatifs <sup>[118]</sup> Facile et compréhensible par l'utilisateur <sup>[121]</sup>
ELECTRE 3	La méthode Electre III est beaucoup plus sophistiquée que Electre II, mais elle exige un grand nombre de paramètres techniques <sup>[121]</sup> Construit une relation de surclassement traduisant une intensité de préférence <sup>[122]</sup> Electre III a été jugée trop complexe et parfois difficile à interpréter <sup>[121], [122]</sup>

L'étude des méthodes d'aide à la décision multicritères, dont certaines ont été présentées aux paragraphes précédents, montre qu'elles se différencient principalement par :

- la façon de modéliser les préférences du décideur,
- la décision de pondérer ou non les critères,
- les attentes du décideur relatives aux résultats.

Les travaux de *Bernard ROY* distinguent quatre problématiques de décision multicritères<sup>[126]</sup> (Tableau 18).

Tableau 18 : Analyse des problématiques des méthodes multicritères d'après les travaux de *Bernard ROY*

	PROBLEMATIQUE DE			
	RANGEMENT DES SOLUTIONS	TRI	CHOIX	DESCRIPTION
Description	Il s'agit d'identifier la ou les meilleures solutions. La procédure recherchée est une procédure de classement.	Il s'agit de trier et/ou de catégoriser les solutions. Ici, on parlera de procédure d'affectation à des catégories.	Il s'agit d'identifier la ou les meilleures solutions. Elle aboutit à la mise au point d'une procédure de sélection.	Il s'agit d'éclairer l'analyse des solutions en aidant le décideur à mieux appréhender celles-ci. En d'autres termes, ces méthodes consistent simplement à décrire les actions et leurs conséquences et non pas à les comparer.
Représentation graphique				
Exemple de méthodes	PROMETHEE I & II	ELECTRE Tri-B	AHP	Plusieurs méthodes peuvent être utilisées <sup>12</sup>
	MAVT		MAUT	
	ELECTRE II		TOPSIS	
	ELECTRE III et IV	ELECTRE Tri-C	ELECTRE I	
	MACBETH		UTA	
	AHP		ELECTRE Is	
	Electre IV		EVAMIX	
	SMART		MAVT	
TOPSIS	SMART			

En résumé, les méthodes d'aide à la décision multicritères se différencient selon le type d'information utilisé en entrée (critères qualitatifs, quantitatifs, nombre de solutions, etc.), la problématique et les résultats fournis en sortie.

<sup>12</sup> Il n'est pas nécessaire que le résultat d'une aide à la décision soit une prescription (l'identification d'une solution). Plusieurs méthodes peuvent donc décrire des solutions.

2.3.1.4. Choisir une méthode multicritères

**Les propositions de la littérature**

Le choix d'une méthode d'analyse multicritères n'est pas facile et c'est certainement la raison pour laquelle de nombreux auteurs sont incapables de justifier clairement leur choix d'une méthode plutôt qu'une autre<sub>[127]</sub>. Néanmoins, des auteurs proposent une méthodologie afin de choisir la méthode la plus appropriée pour répondre au besoin.

Tout d'abord, les travaux de *Guitouni et Martel*<sub>[127]</sub> et plus récemment ceux d'*Ayadi*<sub>[122]</sub> proposent un arbre de décision en fonction des caractéristiques des données, des critères et des aptitudes des méthodes d'analyses à traiter ces données. Une autre solution consiste à établir le tableau des données d'entrée et des informations que l'utilisateur souhaite afficher en sortie (les informations désirées en sortie). Cette méthode « inputs/outputs » proposée par *Guitouni, Martel et Vincke*<sub>[128]</sub> permet de classer les méthodes d'aide à la décision multicritères selon un tableau de 24 inputs et de 7 outputs (matrice de 24x7). Il s'agit alors de sélectionner la ou les méthode(s) situées à l'intersection de la colonne et de la ligne correspondante (*Tableau 19 et annexe 2.5*).

Tableau 19 : La méthode Inputs/outputs d'après Guitouni, Martel et Vincke

INPUTS		OUTPUTS						
Inputs	Signification	Signification						
I1	n structures (P, I) ((P : relation de préférence stricte, Qj : relation de préférence faible, Ij : relation d'indifférence)) de pré ordres.	O1	Evaluation globale: cette situation traduit la volonté de construire un critère unique de synthèse. Le score global est de niveau cardinal.					
I3	n structures (P, I) de semi ordres et/ou structures (P, I, Qj) ((P, I, Qj) ∈ {>, ~, >'}) de pseudo-ordres plus des seuils de veto vj.	O2	Un rangement global des actions: en considérant un seuil d'indifférence: ((>, ~): une structure de semi ordre total) : l'introduction de seuils permet d'introduire des nuances ou limiter certaines conclusions (de surclassement) par exemple.					
I4	n fonctions d'utilité (uj) (d'utilité (valeur) partielle) exprimées sur des échelles intervalles.	O3	Un rangement total des actions: avec possibilité d'ex aequo: ((>, ~): une structure de pré ordre total) : l'objectif dans ce cas est souvent le rangement des actions de la meilleure à la moins bonne. Dans ce cas, toutes les actions sont comparables; il est possible de les discriminer.					
I10	n structures (P, I) de semi ordres et/ou structures (P, I, Qj) de pseudo-ordres et une relation de pré ordre complet (f) sur les attributs (critères).	O4	Un rangement partiel des actions en considérant l'incomparabilité: ((>, ~, >') : une structure de pré ordre partiel qui signifie (Préférence forte, Indifférence, Préférence faible, incomparabilité)) : cet output reprend l'idée de l'output précédent tout en considérant qu'il est possible de ne pas pouvoir discriminer entre certaines actions: on accepte l'incomparabilité.					
I11	n fonctions d'utilité (uj) (d'utilité (valeur) partielle) exprimées sur des échelles intervalles et une relation de pré ordre complet (f) sur les attributs.	O5	Choix de la meilleure action : ou d'une classe d'équivalence des meilleures actions.					
I16	n structures (P, I) de semi ordres et/ou structures (P, I, Qj) de pseudo-ordres plus des seuils de veto vj définies sur des évaluations distributionnelles plus une relation de pré ordre complet (f) sur les attributs.	O6	Choix d'un sous-ensemble d'actions: parmi lesquelles se trouve(nt) la (les) meilleure(s) action(s).					
I17	n structures (P, I) de pré ordres plus un vecteur de coefficients d'importance relative (Π) des attributs.	O7	Tri ordonné: affecter les actions à des catégories pré-définies et ordonnées.					
I18	n structures (P, I) de semi ordres et/ou structures (P, I, Qj) de pseudo-ordres plus un vecteur de coefficient d'importance relative (Π) des attributs.							
I19	n structures (P, I) de semi ordres et/ou structures (P, I, Qj) ((P, I, Qj) ∈ {>, ~, >'}) de pseudo-ordres plus des seuils de veto vj plus un vecteur de coefficient d'importance relative (Π) des attributs.							
I20	n fonctions d'utilité (uj) (d'utilité (valeur) partielle) exprimées sur des échelles intervalles plus un vecteur de coefficient d'importance relative (Π) des attributs.							
I21	n fonctions d'utilité (uj) (d'utilité (valeur) partielle) exprimées sur des échelles ratios plus un vecteur de coefficient d'importance relative (Π) des attributs.							
I24	n structures (P, I) de semi ordres et/ou structures (P, I, Qj) de pseudo-ordres plus des seuils de veto vj définies sur des évaluations distributionnelles plus un vecteur de coefficient d'importance relative (Π) des attributs.							
MATRICE DE 24x7								
Input	Output							
	O1	O2	O3	O4	O5	O6	O7	
I1			Borda Condorcet		Conjonctive Disjonctive			
I2								
I3				Electre IV				
I4					MaxiMin			
I5								
I6								
I7								
I8								
I9								
I10		Lex. semiord.		ORESTE				
I11								
I12				MELCHIOR				

INPUTS				OUTPUTS			
I13							
I14							
I15							
I16			NAIADE II	NAIADE I			
I17			REGIME QUALIFEX	Electre III	MACBETH	Electre I	
I18			Promethee 2	Promethee 1			Electre TRI
I19			Evamix	Electre III		Electre IS	
I20	Somme pondérée MAUT TOPSIS		MAVT SMART UTA				ELECTRE IS
I21	AHP				MaxiMin flou		
I22							
I23							
I24			PAMSSEM II	PAMSSEM I			

Enfin, *Maystre et al.*<sup>[128]</sup>, proposent une procédure, via un organigramme, de choix d'une méthode, mais qui est uniquement applicable à la famille **ELECTRE** (Figure 27).

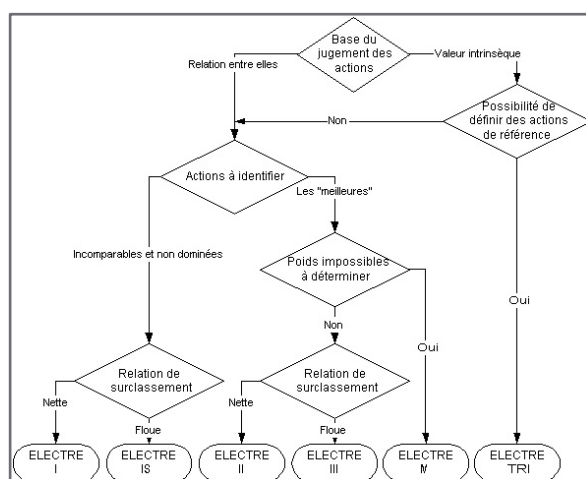


Figure 27 : Procédure de choix d'une méthode ELECTRE d'après Maystre et al

### Notre analyse et notre proposition

Comme nous l'avons déjà signalé au point §2.3.1.3, il est difficile d'affirmer qu'une méthode multicritères est meilleure qu'une autre. Le choix d'une méthode dépend de la problématique, des critères sélectionnés, des données disponibles et des aspects méthodologiques que l'on souhaite mettre en avant. Nous proposons de choisir une méthode multicritères à partir des spécificités des méthodes multicritères (Tableau 24) et du cahier des charges (les exigences) du commanditaire d'une étude multicritères d'aide à la décision.

Dans le cadre des travaux, plusieurs exigences méthodologiques, jugées prioritaires et nécessaires pour le choix d'une méthode multicritères d'aide à la décision, ont été identifiées. Celles-ci sont précisées dans le Tableau 20 ci-dessous :

Tableau 20 : Cahier des charges de l'outil envisagé

EXIGENCES DEMANDEES	COMMENTAIRES	METHODES POSSIBLES
Choix strict d'une installation	La méthode doit permettre au décideur de choisir une installation sans ambiguïté. En d'autres termes, il s'agit de	Uniquement, les méthodes d'inspiration américaine (AHP

EXIGENCES DEMANDEES	COMMENTAIRES	METHODES POSSIBLES
	ne pas retenir les méthodes multicritères qui conduiraient un résultat d'incomparabilité	— UTA — EVAMIX — TOPSIS — MAUT – AVT)
Prise en compte de plusieurs avis d'experts	Plusieurs avis d'experts d'horizons différents doivent intervenir Ceci seront interrogés individuellement. La méthode doit pouvoir prendre en compte l'ensemble des avis d'experts.	L'ensemble des méthodes.
Prise en compte de critères qualitatifs et quantitatifs	Les critères retenus sont à la fois des critères qualitatifs et quantitatifs. Ces derniers possèdent également des échelles de construction différentes.	AHP — Famille ELECTRE — UTA — Famille PROMETHEE — MACBETH
Interprétation des résultats	L'interprétation des résultats doit être simple et sans ambiguïté.	AHP — TOPSIS — PROMETHE II — MACBETH
Adaptabilité/flexibilité de la méthode	La méthode doit être adaptable sur plusieurs points : – Ajout/modification/suppression de critères sans solliciter à nouveau les experts pour l'ensemble du modèle. – Mise à jour des données d'entrée. Les experts ne doivent pas être interrogés pour chaque cas d'étude. La méthode doit alors pouvoir accepter une base de données d'avis d'experts afin d'« automatiser » (en fonction de plusieurs paramètres) les cas d'étude. – Elle doit également pouvoir prendre en charge la base de données d'experts.	AHP
Transparence de la méthodologie	La méthode doit donner la possibilité à toute personne de vérifier la cohérence des résultats et de comprendre chaque étape de calcul, de visualiser les pondérations des critères et l'importance de chacun d'entre eux dans les résultats finaux.	AHP — TOPSIS — SMART
Facilité d'application	La méthode doit être simple d'utilisation afin d'interroger un panel d'experts assez important dans un délai imparti (bâtir une base de données d'expertises métier sur le secteur des déchets).	AHP — TOPSIS — ELECTRE I
Analyse de sensibilité simple et rapide	La méthode doit donner la possibilité à toute personne de faire des analyses de sensibilité (poids des critères, hypothèses et qualité de la donnée) sur les résultats finaux de la comparaison.	PROMETHEE — AHP
Multifonctionnalité	La méthode doit pouvoir pondérer les critères, déterminer l'importance des éléments composant les échelles d'évaluation des critères et comparer différentes solutions.	AHP — ELECTRE — EVAMIX — PROMETHEE — MACBETH —
Compensation	Cette caractéristique (considérée comme un désavantage dans la littérature) a la propriété de contrarier un critère à poids fort. Elle permet alors de discuter et d'expliquer les pour et les contres d'une solution sur l'ensemble des critères.	Principalement, les Méthodes d'inspiration américaine (AHP — UTA — EVAMIX — TOPSIS — MAUT – MAVT) et PROMETHEE 2.
Polyvalence	La méthode doit pouvoir comparer plusieurs solutions et le nombre de solutions peut varier en fonction du déchet et/ou du territoire étudié sans remettre en cause la structure générale du modèle.	AHP

Nous avons combiné les informations du *Tableau 20* ci-dessus avec la synthèse des caractéristiques des méthodes multicritères d'aide à la décision (*Tableau 24*). Il en ressort que la méthodologie **Analytic Hierarchy Process (AHP)**, est la méthode d'analyse multicritères la plus adéquate pour répondre à l'ensemble nos exigences. C'est donc celle que nous retiendrons pour ce travail de thèse, elle est présentée au point suivant de ce chapitre.

### 2.3.2. La méthode Analytic Hierarchy Process (AHP)

La méthode Analytic Hierarchy Process (AHP) propose d'organiser un problème décisionnel sous la forme d'une structure hiérarchique<sup>[120], [129]–[131]</sup>. Cette hiérarchisation permet d'organiser les critères selon leurs spécificités (environnements, économiques, etc..) et de mettre en évidence ceux qui ont un impact important dans la décision finale (les critères avec un poids fort). Cette méthode est utilisée dans de nombreux domaines<sup>[132]</sup> tels que les choix gouvernementaux<sup>[132]</sup>, l'industrie<sup>[133]</sup>, le sport<sup>[131]</sup>, le développement

durable<sup>[134]</sup>, l'optimisation de la fiabilité<sup>[122]</sup> (classement des risques), l'agronomie<sup>[135]</sup>, ou encore la gestion des déchets<sup>[40], [120], [136], [137]</sup>. Cette méthode propose d'aider un décideur à réduire un problème complexe en une série de comparaison deux à deux (comparaison par paire). Le *Tableau 21* ci-dessous illustre la comparaison de 2 critères.

Tableau 21 : Exemple de comparaison par paire

CRITERE	ÉCHELLE SEMANTIQUE									CRITERE
Le respect de la hiérarchie de la gestion des déchets	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Respect du principe de proximité

Pour faciliter les séries de comparaison, les préférences sont couramment données sous la forme d'une matrice de comparaison (*Tableau 22*) :

Tableau 22 : Exemple de matrice de performance

	CRITERE 1	CRITERE 2	CRITERE 3	CRITERE 4
Critère 1	<b>1,00</b>	A	B	C
Critère 2	1/A	<b>1,00</b>	D	E
Critère 3	1/B	1/D	<b>1,00</b>	F
Critère 4	1/C	1/E	1/F	<b>1,00</b>

La matrice de comparaison, réalisée à partir du jugement d'experts, génère une importance relative (un poids) pour chacun des critères. L'expert est aidé dans son jugement par une échelle sémantique, également appelée échelle verbale (*Tableau 23*).

Tableau 23 : Échelle sémantique d'AHP

ÉCHELLE VERBALE	ÉCHELLE NUMERIQUE	COMMENTAIRES
Les deux éléments sont égaux	1	Deux éléments contribuent autant à la propriété
L'élément domine modérément l'autre	3	L'expérience et l'appréciation personnelles favorisent légèrement un élément par rapport à un autre
L'élément domine l'autre	5	L'expérience et l'appréciation personnelles favorisent fortement un élément par rapport à un autre
L'élément domine très fortement l'autre	7	Un élément est fortement favorisé et sa dominance est attestée dans la pratique
L'élément est absolument dominant	9	Les preuves favorisant un élément par rapport à un autre sont aussi convaincantes que possible
Les valeurs intermédiaires (2, 4, 6, 8) peuvent être utilisées pour affiner le jugement		

Il s'agit ensuite de synthétiser les résultats où, plus le score est élevé, meilleure est la performance de l'alternative par rapport aux critères considérés. Il s'agit ensuite de déterminer un score global pour chaque option (alternative) afin de fournir le classement des différentes solutions étudiées.

Une fois la méthode multicritères choisie, il faut sélectionner et construire les critères nécessaires et suffisants pour le choix d'une installation de gestion de déchets. L'état de l'art réalisé sur les méthodes et outils appliqués à la gestion des déchets nous a permis d'identifier les critères utilisés pour caractériser les performances sur l'environnement, la dimension économique, sur les aspects territoriaux, techniques et réglementaires. Nous proposons de classer et de décrire ces critères selon les dimensions étudiées dans le cadre des travaux de thèse dans les parties ci-après.

La *Figure 28* ci-dessous remet en perspective, sous la forme d'un organigramme, les aiguillages et les choix effectués entre les différentes méthodologies disponibles, qui nous ont mené à retenir la méthode **Analytic Hierarchy Process (AHP)**.

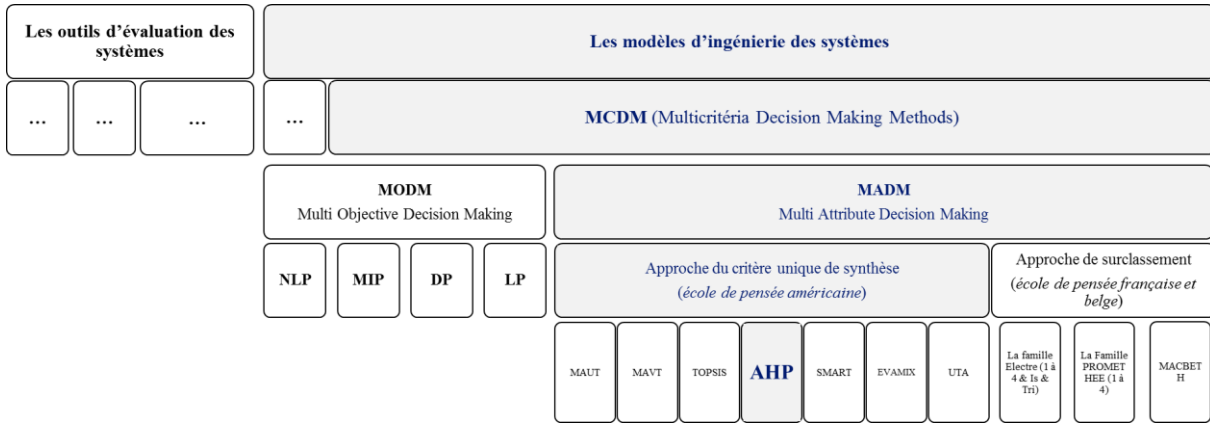


Figure 28 : Les différentes méthodes et aiguillages

Tableau 24 : Synthèse, non exhaustive, des caractéristiques des méthodes multicritères d'aide à la décision

CARACTERISTIQUES	AHP	ELECTRE 3	PROMETHEE 1	PROMETHEE 2	EVAMIX	TOPSIS	MACBETH
Problématique de choix	Oui	Non	Non	Non	Oui	Oui	Non
Problématique de rangement des solutions partiel (p) ou complet (C)	C	P	P	C	-	-	P
Problématique de tri	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non
Problématique de description	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non
Transparence de la méthodologie	+++	++	+++	+++	++	+++	++
Compensation	Oui	Non	Semi-compensatoire	Compensatoire	Oui	Oui	Non
Comparaison par paire	Oui	Non	Non	Oui	Non	Non	Oui
Facilité d'application	+++	+	++	++	+	+++	++
Adaptabilité de la méthode sans remettre en cause l'ensemble des constructions (mise à jour des avis d'expert, suppression et ajout de critères)	Oui	Non	Non	Non	Non	Oui	Non
Adaptabilité de la méthode (base de données d'avis d'expert pour plusieurs cas d'étude).	Oui	Non	Non	Non	Non	Oui	Non
Mélange des critères qualitatifs (Q) et quantitatifs (Qu)	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Non (Qu)	Non (Qu)
Pondération qualitative (Q) ou quantitative (q)	Q	q	q	q	Q	Q	Q
Interprétation des résultats	+++	+	++	++	+++	+++	++
Déjà utilisée dans la gestion des déchets	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Oui	Non
Agrégation Comparaison (AC) Comparaison Agrégation (CA)	AC	CA	CA	CA	AC	AC	CA
Agrégation des préférences individuelles	Non	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Oui
Agrégation des évaluations	Oui	Non	Non	Non	Oui	Oui	Oui/Non
Agrégation des préférences individuelles pour former un groupe	Oui	Non	Non	Non	Non	Non	Non
Quantité d'information à renseigner	Beaucoup	Moyen	Moyen	Moyen	Moyen	Moyen	Beaucoup
Incomparabilité	Non	Oui	Oui	Non	Non	Non	Oui
Structure hiérarchique incomplète	Oui	Non	Non	Non	Non	Non	Non
Polyvalence (définition donnée au Tableau 20)	Oui	Non	Non	Non	Non	Non	Non



## 2.4. LES CRITERES ETUDIES DANS LA LITTERATURE LIES A LA GESTION DES DÉCHETS

### 2.4.1. Les critères environnementaux

Comme nous l'avons souligné dans le *chapitre 1*, la majorité des études environnementales liées à la gestion des déchets sont traitées à partir de la méthode « Analyse de Cycle de Vie »<sup>[20]</sup>. Ainsi, le *Tableau 25* ci-dessous propose un recensement des critères ACV couramment utilisés dans les études portant sur la gestion des déchets.

Tableau 25 : Les critères environnementaux étudiés dans les ACV déchets

NOM	COMMENTAIRES	SOURCES
Global Warming Potential (GWP)	Ce critère est utilisé dans la majorité des études multicritères et ACV déchet. Il permet de comparer les installations en fonction de leurs impacts sur le changement climatique. La variable principale est le processus ou la technologie de l'installation.	[40], [50], [57], [66], [74], [75], [78], [138]–[148]
GWP Transport	Ce critère se base sur le même principe que le précédent à la différence, qu'il ne mesure pas les impacts potentiels sur le changement climatique des installations de gestion de déchets, mais les impacts liés au transport. Les variables sont la distance parcourue et les moyens de transport utilisés.	[149]
Acidification	L'acidification atmosphérique correspond à l'augmentation de la teneur en substances acides dans la basse atmosphère, à l'origine des « pluies acides » et notamment du dépérissement de certaines forêts. <i>Marchand</i> , précise que cet impact est calculé à 70 % dans les ACV déchets <sup>[50]</sup> . Comme cet impact est un phénomène régional, le résultat du calcul global de l'impact d'une filière en termes d'acidification doit être nuancé par la distribution spatiale des émissions contribuant à cet effet. D'après la communauté scientifique internationale sur les ACV, cet indicateur nécessite des améliorations dans sa construction <sup>[68]</sup> .	[50], [57], [66], [74], [75], [78], [140], [141], [145], [146]
Land Use/demand	L'indicateur occupation des terres indique l'impact (l'ampleur des changements) relatif à l'occupation et à la transformation de terres liées à des activités humaines comme l'agriculture, la construction d'habitations, de routes, etc. <i>Marchand</i> , précise que cet impact est calculé à 6 % dans les ACV déchets <sup>[50]</sup> . De plus ce dernier est à utiliser avec précaution dans les études <sup>[68]</sup> .	[40], [66], [142], [147], [150]–[154]
Eutrophisation	L'eutrophisation d'un milieu aqueux se caractérise par l'introduction de nutriments, sous la forme de composés azotés et phosphatés par exemple, qui conduit à la prolifération d'algues et par suite dans un premier temps à une forte consommation de CO <sub>2</sub> dissous en présence de lumière (par photosynthèse) et donc à une alcalinisation des eaux, puis dans un second temps à une décomposition bactérienne qui entraîne une diminution de la teneur en oxygène dissous dans l'eau ; ceci peut conduire à la mort de la faune et de la flore du milieu aquatique considéré. <i>Marchand</i> , précise que cet impact est calculé à 61 % dans les ACV déchets <sup>[50]</sup> . D'après la communauté scientifique internationale sur les ACV, cet indicateur nécessite des améliorations dans sa construction <sup>[68]</sup> .	[50], [57], [66], [74], [76], [140], [141], [145], [146]
Ozone depletion	Mesure le potentiel d'appauvrissement de la couche d'Ozone dans la stratosphère. <i>Marchand</i> , précise que cet impact est calculé à 31 % dans les ACV déchets <sup>[50]</sup> alors que ce dernier est recommandé et jugé satisfaisant par la communauté scientifique <sup>[68]</sup> . Cependant, le protocole de Montréal, signé en 1987, interdit progressivement l'utilisation des substances appauvrissant la couche d'ozone (CFC, Halons, etc.). Ce protocole a été une réussite (application par les pays) et la destruction de la couche d'ozone d'origine anthropique semble être un problème résolu.	[50], [57], [78], [141], [145], [146]
Photochemical Ozone Formation	Cet indicateur mesure la présence d'ozone au niveau du sol qui est toxique pour les humains à forte concentration. L'ozone a des effets sur la santé humaine, les écosystèmes forestiers et agricoles, de plus ce phénomène de pollution photo-oxydante est intimement lié à celui des pluies acides. <i>Marchand</i> , précise que cet impact est calculé à 50 % dans les ACV déchets <sup>[50]</sup> . D'après la communauté scientifique internationale sur les ACV, cet indicateur nécessite des améliorations dans sa construction <sup>[68]</sup> .	[50], [66], [75], [78], [140], [145]
Abiotique Déplétion	Les activités humaines nécessitent l'extraction de ressources naturelles (bois, pétrole, minerai de fer, etc.). Ces ressources sont pour certaines non renouvelables et la question de leur épuisement se pose alors. On s'intéresse ici à l'épuisement des ressources abiotiques, c'est-à-dire les ressources non vivantes (minerai, etc.) extraites de la géosphère vers la technosphère. Il est très difficile de définir un indicateur objectif et stable dans le temps. En effet, en fonction des innovations et des découvertes de gisements, les ressources connues évoluent. De plus, certaines ressources sont très abondantes à la surface de la Terre et il devient difficile (pour certains déchets) de	[50], [57], [66], [140], [142], [146], [148], [153]



NOM	COMMENTAIRES	SOURCES
	montrer une véritable « économie » de ressources dans le cadre d'une valorisation. <i>Marchand</i> , précise que cet impact est calculé à 22 % dans les ACV déchets <sup>[50]</sup> . De plus ce dernier est à utiliser avec précaution dans les études <sup>[68]</sup> .	
Human Toxicity	Ces indicateurs évaluent l'impact sur l'homme et sur différents écosystèmes (terrestre, sédimentaire, aquatique) dû à des toxiques chimiques. La toxicité est l'aptitude à provoquer des dommages chez un organisme vivant. Toute substance chimique est donc potentiellement toxique. Cependant, cette toxicité dépend de la dose (quantité de substance nécessaire pour provoquer le dommage), du mode d'administration de la substance (inhalation, ingestion, contact, etc.), de la posologie de la substance (dose unique, doses répétées, etc.), du type et de la gravité du dommage, ainsi que du temps nécessaire pour que le dommage apparaisse. On parle de toxicité pour l'homme et d'écotoxicité sur les écosystèmes. L'évaluation des catégories d'impact « toxicité et écotoxicité » dans les ACV est aujourd'hui un sujet de débat en Europe. En effet, bien qu'ils soient utilisés dans 32 % des études ACV déchets <sup>[50]</sup> , ces indicateurs ne sont pas recommandés par la communauté scientifique <sup>[68], [155]</sup> .	[50], [57], [66], [78], [137], [140], [141], [153], [156]
Ecotoxicité terrestre		[50], [78], [141]
Ecotoxicité aquatique		[50], [78], [141]
Ecotoxicité marine		[50], [141]
Material Recovery	Taux de matière recyclé. Pas plus de détails.	[139], [142], [147], [150], [154], [157]–[159]
Energie totale	Cet indicateur somme les consommations d'énergie primaire sur l'ensemble du cycle de vie. C'est-à-dire qu'il agrège les consommations de ressources énergétiques : il comptabilise tous les types d'énergie, qu'elles soient non renouvelables, renouvelables épuisables ou renouvelables inépuisables. La demande d'énergie n'est pas un indicateur d'impact potentiel dans la mesure où elle ne traduit pas un effet sur l'environnement. <i>Marchand</i> précise que cette indication est calculée à 29 % dans les ACV déchets <sup>[50]</sup> . Cette information est utilisée principalement pour obtenir l'indicateur d'énergie non renouvelable.	[75], [141], [147]
Déchets	Ces indicateurs mesurent la qualité de déchets non dangereux, déchets dangereux et déchets nucléaires engendrés par le cycle de vie d'un produit. Cette information est publiée à 10 % dans les études ACV déchets et plus précisément sur les ACV déchets liées au bâtiment et à la construction.	[141]
Déchets radioactifs		
Non renouvelable energy	Cet indicateur est associé au risque d'épuisement de ressources fossiles ou minérales. La ressource à la base de cette énergie n'est pas remplacée ou remplacée très lentement par des processus naturels.	[75]
Net Energy Recovery	Seul un des auteurs, <i>Chang et Poon</i> précise ce qu'il entend par « Energy recovered less energy used » <sup>[142]</sup> . Il s'agit de comprendre que l'énergie récupérée via la valorisation est moins importante que l'énergie utilisée pour valoriser le déchet.	[142], [150]
Agricultural land use	Utilisation des terres agricoles pour la construction d'un nouveau site. Cet indicateur est divisé en trois catégories : terres agricoles, les vergers et les terres inutilisées. L'auteur précise son échelle : les sites d'enfouissement ne doivent pas être situés sur des zones agricoles (note de 0). La catégorie des vergers obtient 5 sur l'échelle et 10 pour la catégorie des terres inutilisées.	[151]

Nous avons également identifié des critères qui ne sont pas des indicateurs de type ACV ou du moins, difficilement interprétables (manque de description). Ces critères sont présentés en *annexe 2.6*. En résumé, il existe plusieurs critères environnementaux, mais la grande majorité des indicateurs de type ACV ne sont pas recommandés par la communauté scientifique en raison des lacunes liées aux méthodologies de construction ou en rapport avec la qualité des données utilisées<sup>[68], [155]</sup>. On peut émettre l'hypothèse que, malgré la non recommandation, leur utilisation dépend des méthodes de calcul ACV utilisées puisque ces dernières fournissent les résultats d'une étude selon un jeu d'indicateurs prédéfini. À ce jour, seul l'indicateur portant sur le changement climatique fait consensus et est recommandé par la communauté scientifique<sup>[68], [155]</sup>. Les autres indicateurs d'impacts ACV nécessitent des améliorations dans leur construction. Néanmoins, il apparaît clairement auprès de l'ADEME, de FEDEREC et du Ministère de l'Environnement que les notions de ressources, d'énergie et de consommation d'eau sont des indications prioritaires à prendre en compte dans la gestion des déchets et plus largement dans le cadre de la transition de notre modèle vers une économie circulaire.

### 2.4.2. Les critères économiques

Les critères économiques identifiés dans la revue de la littérature traitent des différents aspects de coût. Le *Tableau 26* ci-dessous spécifie les différents critères économiques que nous avons identifiés :

*Tableau 26 : Les critères économiques identifiés*

NOM	COMMENTAIRES	SOURCES
Capital costs	Ces coûts sont fixes, ils correspondent à l'achat du terrain, la construction d'un ou plusieurs bâtiments et à l'achat des équipements. Ce critère est surtout utilisé pour le choix d'implantation (terrain et technologique) pour une nouvelle d'installation.	[75], [120], [137], [139], [142], [147], [150], [154], [160]–[162]
Costs of operation and maintenance	Ces coûts sont variables et dépendants de chaque installation (processus de traitement et main d'œuvre).	[40], [66], [120], [137]– [140], [142], [146], [147], [149], [150], [153], [156], [158], [159], [161]–[164]
Construction Cost	Distingué du critère Capital cost, c'est surtout un sous-critère de ce dernier, qui prend en compte la construction de l'installation.	[150], [164]
Transport Cost	Ces coûts sont variables et dépendants de chaque installation. La distance à parcourir, les caractéristiques du déchet (dangerosité et nature) et le moyen de transport sont les variables de ce critère.	[142], [149]
Demand for secondary building materials	L'utilisation des déchets de bâtiment en tant que matière première secondaire évite l'importation de ressources naturelles auprès des entrepreneurs. Ces auteurs cherchent à en mesurer l'intensité de la demande. <i>Banias et al.</i> proposent de mesurer cette intensité via le nombre de permis de construire.	[147], [153], [160]
Number of competitors for the process	Pas de détails.	[163]
Number of competitors accepting the secondary residues	Pas de détails.	[163]
Intrusion into natural aggregates market	Divisé en deux sous critères (Natural aggregates production et Recycled aggregates production), ces derniers permettent de mesurer l'influence des matériaux recyclés dans un processus industriel. L'auteur souligne (après recherche) que ce critère est négligeable dans le contexte des gravats de la déconstruction et ne l'a pas retenu pour son cas d'étude.	[149]

À travers ces critères, on remarque clairement que les coûts sont les plus étudiés, mais qu'il existe dans le cadre des études de gestion des déchets, des critères qui font apparaître une notion de concurrence et d'intégration du matériau dans le marché secondaire.

### 2.4.3. Les critères territoriaux

Au niveau du territoire, nous avons identifié plusieurs critères utilisés dans les études portant sur la gestion des déchets. Pour faciliter la lecture, nous avons classifié les critères selon l'objet de l'étude. En effet, il existe des critères territoriaux plutôt centrés sur des aspects sociaux (*Tableau 27*), techniques (*Tableau 28*) et géologiques (*Tableau 29*).

*Tableau 27 : Extrait des critères territoriaux d'ordre social*

NOM	COMMENTAIRES	SOURCES
Acceptance	Il s'agit de l'acceptabilité du public par rapport à la mise en place d'un nouveau système de management de gestion des déchets (implantation d'une nouvelle installation). Par exemple, Ferigutti, propose un critère d'évaluation à trois niveaux pour mesurer l'acceptabilité : (i) peu de contestation, (ii) contestations ponctuelles et (iii) contestations locales <sub>[162]</sub> .	[137], [142], [147], [149], [150], [153], [161], [162]

NOM	COMMENTAIRES	SOURCES
Employment and Job Creation (quantity and quality)	D'une manière générale, les auteurs proposent de mesurer le nombre d'emplois créés en rapport avec à la gestion des déchets. Par exemple, Roussat, Dujet et Méhu proposent de tenir compte du nombre d'emplois créés dans le cadre d'un chantier de déconstruction <sup>[148]</sup> .	[40], [66], [137], [139], [140], [147], [148], [156], [158], [160]
Quality of life	Ce critère est composé de plusieurs critères liés à la qualité de vie des employés, mais aussi des résidents à proximité d'un chantier de démolition.	[148]
Cooperation	Pas de détails.	[137]
Residential areas	Il s'agit de la distance entre une installation de gestion de déchets et les zones résidentielles. Le concepteur du critère précise que selon la législation grecque et les directives européennes, l'emplacement d'une décharge est interdit lorsque la distance avec une zone résidentielle est inférieure à 500 mètres. Il ne s'agit pas seulement de répondre à l'acceptabilité optique (effet NIMBY), mais aussi d'éviter une détérioration possible de la valeur du terrain.	[152]
Tourism	L'auteur précise qu'il a sélectionné ce critère en raison du cas particulier de son étude. En effet, il s'agit d'une île (île de Wight) dont la viabilité économique dépend essentiellement du tourisme qui est un sujet particulièrement préoccupant pour les communautés insulaires.	[156]
Land Value	L'auteur propose ce critère comme un indicateur de mesure de développement économique. L'unité est en €/acre. L'acre est une unité anglo-saxonne où 1 acre est environ égale à 4046 m <sup>2</sup> . Il s'agit de prendre en compte les différents types de coûts liés au développement d'une unité de gestion des déchets.	[160]
Land value degradation	L'auteur propose de mesurer les dommages économiques liés au foncier. En effet, une unité de gestion des déchets perturbe l'environnement local en termes d'esthétisme et de pollution. En ce sens, l'implantation d'une unité de gestion entraîne une dégradation économique indirecte de la zone locale. Pour qu'une unité soit acceptée socialement, cette dégradation doit être la plus faible possible.	[160]

Le *Tableau 27* ci-dessus montre qu'il existe plusieurs critères liés aux aspects sociaux du territoire. Certains critères s'appliquent à des installations de traitements existantes comme le nombre d'employés ou la qualité de vie, alors que les autres critères sont plutôt des critères utilisés dans le cas d'une étude pour de nouvelles implantations d'unités de gestion sur un territoire.

*Tableau 28 : Les critères territoriaux d'ordre technique*

NOM	COMMENTAIRES	SOURCES
Accessibility	Globalement, il s'agit d'un critère permettant de mesurer l'accessibilité des transporteurs à l'installation de traitement des déchets. Il existe plusieurs façons de mesurer. Par exemple, <i>Banias et al.</i> , propose les deux critères suivants : (i) le type de route (ii) et la distance entre l'installation et la gare de marchandises ferroviaire la plus proche <sup>[160]</sup> .	[40], [151], [152], [160], [163]
Traffic burden	<i>Banias et al.</i> , propose ce critère pour mesurer les conditions de circulation locale et les conséquences attendues à propos d'une future installation de traitement des déchets. L'échelle proposée, entre 1 et 10, est qualitative <sup>[160]</sup> . Pour, <i>Den Boer, den Boer et Jager</i> , il s'agit de mesurer les conséquences environnementales, sociales et économiques du trafic routier <sup>[66]</sup> .	[66], [160]

Nous avons recensé très peu de critères territoriaux en rapport avec cette catégorie technique (*Tableau 28*). Cette situation s'explique probablement par le fait que la majorité des études introduisant la notion de territoire portent principalement sur les aspects géologiques puisqu'elles traitent de l'implantation de nouvelles installations de traitements. En conséquence, les auteurs utilisent de nombreux critères qui servent principalement à évaluer la qualité du milieu envisagé. Le territoire est alors étudié comme un support de l'infrastructure et non comme une dimension à part entière. Nous présentons dans le *Tableau 29* ci-dessous un extrait des critères que nous avons identifiés dans les travaux de la littérature.

Tableau 29 : Extrait des critères territoriaux d'ordre géologique ou topographique

NOM	COMMENTAIRES	SOURCES
Topography	Il s'agit d'un indicateur mesurant l'adéquation entre les caractéristiques du site envisagée et le cahier des charges prévu pour le terrain de l'installation.	[40], [160]
Geo-chemical barrier	Pas de détails	[163]
Groundwater level	Pas de détails	[40]
Elevation	D'après les auteurs, le niveau de la mer est un facteur important dans le processus d'élimination des déchets. En effet, il précise que « les sites proches du niveau de la mer présentent un risque élevé de contamination en cas d'inondation ». L'auteur propose donc un critère qui permet d'évaluer l'élévation du site de gestion des déchets par rapport au niveau de la mer. Ainsi, plus le site potentiel est élevé, meilleure est la note sur le critère.	[152]
Hydrogeology–geology	Les auteurs décrivent ce critère comme un critère de prévention de la pollution de l'eau, en particulier dans les zones à proximité des eaux souterraines, qui peut intervenir suite à une fuite de lixiviat lors de la gestion des déchets dans les zones à forte vulnérabilité.	[152]

Comme nous l'avons évoqué précédemment, les critères territoriaux d'ordre géologique ou topographique (Tableau 29) sont surtout utilisés dans le cadre d'études liées à la mise en place de nouvelles installations sur un territoire. Or, dans notre contexte, il s'agit de comparer des installations existantes. Il est donc certain que la majorité de ces critères ne seront pas retenus dans le cadre de nos travaux.

#### 2.4.4. Les critères techniques

Les critères territoriaux d'ordre technique que nous avons identifiés (Tableau 30) sont majoritairement utilisés pour comparer la capacité des installations à gérer un déchet sur différentes caractéristiques :

Tableau 30 : Extrait des critères techniques

NOM	COMMENTAIRES	SOURCES
Feasibility / Usability/ complexity and Compatibility	Seul <i>Ferigutti</i> propose une construction de ce critère : il s'agit d'un critère qualitatif à trois niveaux (i) faisabilité très favorable, (ii) faisabilité favorable et (iii) faisabilité peu favorable <sup>[162]</sup> .	[40], [66], [137], [147], [150], [154], [162], [163]
Flexibility and adaptability	Pour <i>Oyoo, Leemans et Mol</i> , le critère flexibilité et l'adaptabilité fait référence aux différents efforts (hors coût), nécessaires, pour modifier une technologie de gestion de déchets lorsque de nouvelles conditions techniques apparaissent (croissance ou décroissance des flux) ou pour répondre à un changement législatif. Cet effort, est évalué en mesurant la facilité d'adaptation que l'installation à répondre aux nouvelles exigences. Il part du postulat qu'un site local a une plus grande flexibilité qu'une installation de grande ampleur <sup>[158]</sup> . Pour <i>Ferigutti</i> , il s'agit de la capacité de l'installation à traiter des contaminations. Ainsi son critère est composé d'une échelle à deux niveaux d'évaluation : (i) Traite des contaminations mixtes et (ii) Traite seulement des organiques ou des inorganiques <sup>[162]</sup> . Les autres auteurs ne donnent pas de détails quant à la construction du critère ou à sa description.	[150], [158], [162], [163]
Reliability (maintenance)	Seuls, <i>Hokkanen et Salminen</i> et <i>Oyo et Leemans et Mol</i> précisent une description du critère. Les premiers auteurs décrivent ce critère comme un moyen d'estimer la fiabilité technique de chaque alternative. Peux eux, les estimations ne peuvent être faites que par des experts. Les auteurs ont mené des interviews dans lesquelles, un certain nombre d'experts ont évalué la fiabilité technique de plusieurs installations de gestion des déchets ménagers et assimilés à partir d'une note comprise entre 0 à 10 <sup>[147]</sup> . <i>Oyoo, Leemans et Mol</i> , proposent de mesurer la fiabilité en fonction de la qualité des entretiens des systèmes (maintenance) et de la dépendance à l'égard des fournitures externes. Ainsi, il part du postulat que plus un système de traitement est simple (fosse septique ou latrine dans le cadre des boues), plus il est fiable puisqu'il nécessite très peu d'entretien avec des fournitures extérieures <sup>[158]</sup> . Il est important de préciser que le contexte de l'étude se situe dans des pays en voie de développement.	[40], [147], [150], [158], [159]
Capacité de traitement/temps de traitement	<i>Ferigutti</i> , propose de mesurer la capacité et le temps de traitement à partir de trois niveaux d'évaluation (i) >50 tonnes par heure ou < 20 jours, (ii) 10 à 50 tonnes heure ou de 20 à 100 jours et (iii) 40 tonnes par heure ou >100 jours de traitement <sup>[162]</sup> . Les propositions de l'ADEME portent surtout sur des indicateurs de tableaux de bord dans le cadre de suivi et d'évaluation des plans de gestion des déchets ménagers et assimilés <sup>[139]</sup> .	[139], [150], [162]

NOM	COMMENTAIRES	SOURCES
Efficacy/ Technology maturity	Parmi les auteurs, seul <i>Ferigutti</i> décrit le critère. Il propose d'évaluer l'efficacité du traitement en fonction du pourcentage de contamination enlevé. Le critère est alors composé de trois niveaux d'évaluation : (i) plus de 95 %, (ii) entre 80 et 95 % et (iii) moins de 80 % <sup>[162]</sup> .	[125], [147], [153], [154], [158], [163]
Output diversity (quantity of different output)	Pas de détails.	[139], [144]
Quantity of output	L'ADEME décrit cet indicateur de la façon suivante : « Quantification des tonnages sortants des installations de traitements des déchets et déclinés par modes de traitements et/ou services, ainsi que par type de déchets sortant, sur un territoire et à une date ou sur une période donnés » <sup>[139]</sup> .	[139]

### 2.4.5. Les critères réglementaires

Les critères d'ordre réglementaire que nous avons identifiés dans la littérature sont présentés dans le *Tableau 31* ci-dessous.

*Tableau 31 : Les critères réglementaires identifiés dans la littérature*

NOM	COMMENTAIRES	SOURCES
Distance	Peu de description et de détails sont fournis pour ce critère. Néanmoins, il est assez facile de l'interpréter : il s'agit de mesurer et de diminuer au maximum la distance de transport des flux de déchets entre les entités productrices et les installations de gestion.	[137], [139], [142], [160], [163]
National political considerations / Compatibility with the public administration principles	Seuls les auteurs <i>Oyoo, Leemans et Mol</i> précisent le fonctionnement du critère. Il s'agit de mesurer s'il existe des outils pour faciliter la mise en œuvre d'un système de gestion des déchets. En effet, d'après eux, certains systèmes de gestion de déchets nécessitent des incitations politiques pour assurer leur succès. Par exemple, dans le cas de la gestion des déchets ménagers et assimilés, il y a des incitations, sous la forme de subventions et l'application du principe pollueur-payeur afin d'encourager le tri des déchets <sup>[158]</sup> .	[120], [142], [149], [158]
Flexibility of Administration Principles	Pas de détails.	[150]
Reaching the objectives for Waste Management	Seul l'ADEME définit ce critère. Il s'agit de mesurer, via un indicateur de suivi, le taux de recyclage, de réemploi, de valorisation, ou d'élimination et de le comparer par rapport aux objectifs fixés par la réglementation.	[139], [156], [159]
Government support	Pas de détails.	[154]
Legal framework	Il s'agit d'un critère qualitatif. L'auteur cherche à savoir s'il existe un cadre légal applicable dans un contexte de création d'une décharge.	[164]
Political and administrative framework	L'auteur cherche à savoir la complexité administrative liée au projet minier d'enfouissement à cause des conséquences qu'il pourrait avoir avec l'environnement alentour (poussière, bruit et de circulation ou autre). Cette opposition peut être un lourd fardeau administratif et peut, par conséquent, retarder ou empêcher le projet.	[164]

### 2.4.6. Discussion à propos des différents critères identifiés dans la littérature

Cette étude bibliographique met en évidence plusieurs critères d'évaluation établis dans un contexte de gestion des déchets. Ces derniers permettent d'évaluer selon plusieurs dimensions, un choix d'orientation d'une politique à mettre en place pour la gestion des déchets ou le choix d'un site pour la construction d'une nouvelle installation.

Nous avons également identifié un certain nombre de critères en lien avec la gestion des déchets comme le suivi et l'évaluation des projets d'écologie industrielle et territoriale, sur des aspects sociétaux ou plus largement, liés au développement durable et à l'économie circulaire (*Tableau 32*).

*Tableau 32 : Autres sources de critères identifiés*

NOM	DESCRIPTION
COMETHE	COMETHE était un projet de Conception d'Outils METHodologiques et d'Évaluation pour l'écologie industrielle. Ce projet de recherche-action avait pour principal objectif la

NOM	DESCRIPTION
[165]	conception d'une méthodologie et d'outils pour la mise en œuvre de démarches d'écologies industrielles.
Elipse [166]	Le Référentiel ELIPSE (EvaLUatIon des PerformanceS des démarches d'Écologie industrielle et territoriale) a pour objectif de fournir un cadre commun pour l'auto-évaluation des démarches d'écologie industrielle et territoriale (EIT) et leur suivi par les acteurs qui les soutiennent. C'est aussi un outil de promotion des différentes initiatives au niveau national.
Thésaurus-Bercy V1 [167], [168]	C'est un Référentiel français de mesure de la valeur extrafinancière et financière du capital immatériel des entreprises. Il propose des méthodes opérationnelles qui permettent de mesurer les actifs immatériels, avec l'objectif, dans un premier temps, de mieux les gérer pour faire progresser la performance des entreprises et dans un second temps, de les évaluer de façon suffisamment fiables pour servir de base de valorisations et de transactions (fusions, acquisitions, ouverture de capital, ratios bancaires...).

## 2.5. DISCUSSION

Cette revue de la littérature a permis d'identifier les outils, les méthodes et les différents critères utilisés dans un contexte de gestion des déchets. Cette étape répond à notre premier objectif scientifique (avoir une connaissance détaillée des outils, des méthodes et des critères disponibles) (cf. *Chapitre 1*). De plus, grâce à cette revue de la littérature, nous apportons un certain nombre d'éléments nouveaux :

- un état de l'art complet des outils utilisés dans le cadre de la gestion des déchets. Ces derniers ont été présentés avec une courte description via le nom, le type de déchets étudiés, les aspects évalués, la date et l'origine de la méthode,
- une présentation des caractéristiques des méthodes multicritères d'aide à la décision, sans considérer obligatoirement ces mêmes caractéristiques comme des avantages et inconvénients,
- une façon de procéder pour le choix d'une méthode multicritères d'aide à la décision, c'est-à-dire d'étudier les caractéristiques de la méthode et de vérifier leur adéquation avec le cahier des charges voulu,
- un état de l'art complet des critères pris en compte dans les études portant sur la gestion des déchets avec un descriptif pour chacun d'entre eux,

Au vu de la littérature et de notre analyse, nous avons décidé d'utiliser plusieurs éléments de cet état de l'art pour construire notre modèle. En effet, il nous semble pertinent de retenir plusieurs critères (moyennant quelques adaptations) pour évaluer et comparer des installations sur les 5 dimensions retenues. Ainsi, dans le cadre de l'organisation de la thèse, le comité de pilotage a retenu les critères ci-dessous (*Tableau 33*).

Les critères présentés au *Tableau 33* sont détaillés au *Chapitre 4*.

*Tableau 33 : Les 5 familles de critères*

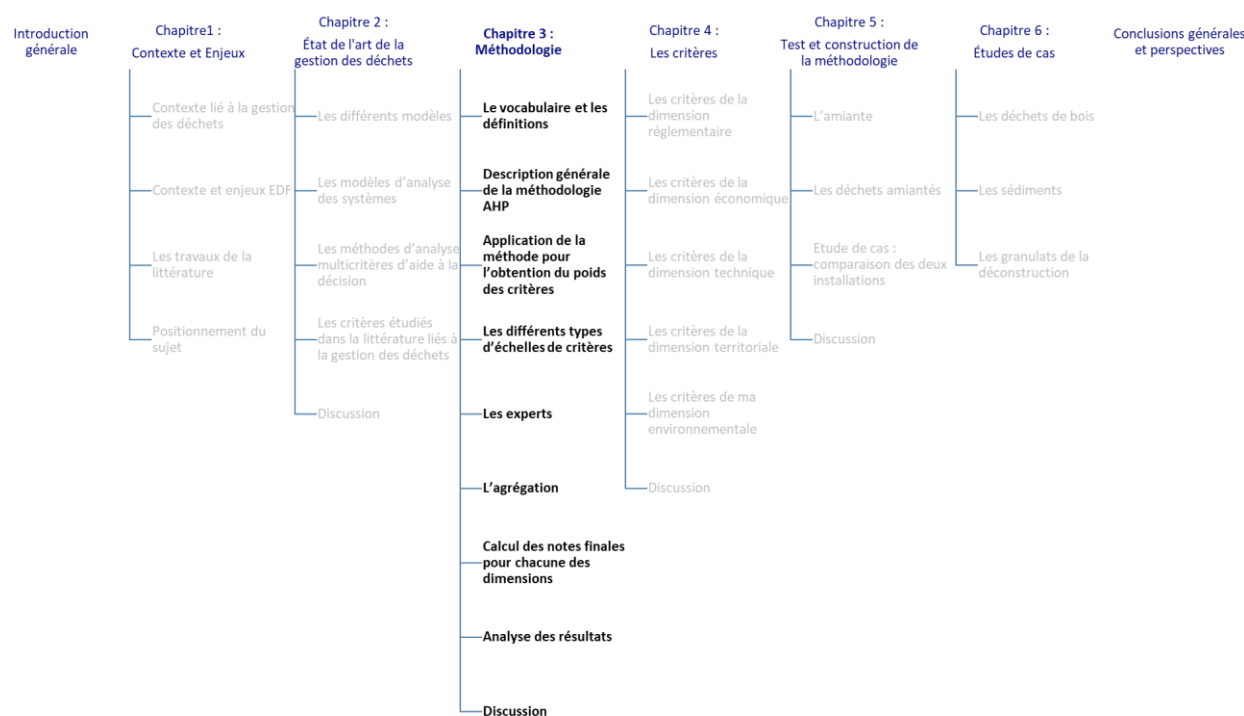
FAMILLE 1 (REGLEMENTAIRE)	FAMILLE 2 (ÉCONOMIE)	FAMILLE 3 (TECHNIQUE)	FAMILLE 4 (ENVIRONNEMENT)	FAMILLE 5 (TERRITOIRE)
R <sub>1</sub> — Respect de la hiérarchie de la gestion des déchets	Ec <sub>1</sub> — Coût d'utilisation de l'installation	T <sub>1</sub> — Pérennité de l'installation	Env <sub>1</sub> — Impacts environnementaux réglementés	Ter <sub>1</sub> — Favoriser l'économie locale (entrée dans la l'installation)
R <sub>2</sub> — Niveau de responsabilité	Ec <sub>2</sub> — Intensité concurrentielle	T <sub>2</sub> — Adéquation du déchet en entrée d'installation (Encadrement)	Env <sub>2</sub> — Impact sur le changement climatique	Ter <sub>2</sub> — Utilisation locale de la ressource (en sortie d'installation)
R <sub>3</sub> — Respect du principe de proximité	Ec <sub>3</sub> — Intensité de la demande	T <sub>3</sub> — Adéquation du produit dans une filière (encadrement)	Env <sub>3</sub> — Économie de ressources vierges	Ter <sub>3</sub> — Capacité à transporter le déchet sur le territoire
R <sub>4</sub> — Positionnement vis-à-vis des objectifs de valorisation		T <sub>4</sub> — Multiplicité d'utilisation du produit	Env <sub>4</sub> — Consommation en eau	Ter <sub>4</sub> — Emploi



FAMILLE 1 (REGLEMENTAIRE)	FAMILLE 2 (ÉCONOMIE)	FAMILLE 3 (TECHNIQUE)	FAMILLE 4 (ENVIRONNEMENT)	FAMILLE 5 (TERRITOIRE)
		T <sub>5</sub> — Capacité d'absorption annuelle de l'installation	Env <sub>5</sub> — Consommation d'énergie	Ter <sub>5</sub> — Incitations locales (politique, économique, réglementaire)
		T <sub>6</sub> — Flexibilité d'absorption de l'installation		

Pour définir l'importance de chaque critère par dimension, nous avons choisi de retenir la méthodologie AHP. Par ailleurs, cette méthode doit être adaptée (cf. §*Chapitre 3*) pour la construction des échelles d'évaluation de certains critères, mais aussi puisque nous souhaitons avoir des résultats de comparaisons sous les 5 dimensions retenues non agrégés.

# CHAPITRE 3 : METHODOLOGIE



## RESUME

Ce chapitre présente la méthodologie élaborée et employée durant les travaux de thèse.

Dans un premier temps, il s'agit de définir les différentes dimensions afin de fixer le cadre de l'étude : *qu'entendons-nous par les dimensions environnementale, technique, économique, réglementaire et territoriale dans le cadre de la gestion des déchets ?* Cette section s'étend également à la définition du vocabulaire couramment employé lors de l'utilisation de méthodes multicritères d'aide à la décision.

Dans la seconde partie, nous décrivons plus particulièrement le fonctionnement de la méthode multicritères Analytic Hierarchy Process AHP qui a été retenue suite à notre état de l'art présenté au *Chapitre 2*. Cette partie est rapidement suivie d'un exemple d'application. Celui-ci permet de s'approprier correctement la méthode AHP.

Ensuite, nous établissons le cahier des charges pour la construction des critères d'évaluation. Il est issu d'une compilation d'éléments qui ont été jugés importants, d'après plusieurs travaux de la littérature, pour la construction de critères et d'indicateurs de performance. Le recours à un cahier des charges donne un caractère rigoureux de la démarche pour établir les critères. Ainsi, chacun des critères est construit sur la même base, c'est-à-dire qu'ils répondent, via plusieurs possibilités qui ont été retranscrites dans une échelle d'évaluation, à une question précise. Les différentes possibilités de construction sont clairement détaillées dans cette partie.

Dans ce chapitre figurent également les différents types d'experts que nous avons mobilisés dans le cadre de nos travaux. Plus particulièrement, nous détaillons la méthode mise en place pour obtenir le poids des critères et les notes des éléments constituant les échelles d'évaluation à partir des avis des experts de cotation. Il y est également expliqué les choix faits pour l'agrégation des résultats et les différentes possibilités de représentation des résultats sur lesquelles nous avons travaillé.

Enfin nous précisons les études de sensibilité à mener afin d'affiner l'interprétation des résultats d'une comparaison lors d'une étude de cas.



## SOMMAIRE DU CHAPITRE 3

<b>3.1. LE VOCABULAIRE ET LES DEFINITIONS</b>	<b>79</b>
3.1.1. Le vocabulaire couramment employé lors de l'utilisation d'analyse multicritères.....	79
3.1.2. Les définitions des dimensions .....	79
3.1.2.1. La dimension réglementaire.....	80
3.1.2.2. La dimension économique.....	80
3.1.2.3. La dimension technique.....	80
3.1.2.4. La dimension territoriale.....	80
3.1.2.5. La dimension environnementale.....	80
<b>3.2. DESCRIPTION GENERALE DE LA METHODOLOGIE AHP</b>	<b>81</b>
<b>3.3. APPLICATION DE LA MEHODE POUR L'OBTENTION DU POIDS DES CRITÈRES</b>	<b>82</b>
<b>3.4. LES DIFFERENTS TYPES D'ECHELLES DE CRITÈRES</b>	<b>85</b>
3.4.1. Le cahier des charges préalable à la construction du modèle.....	85
3.4.2. Les différents types de construction d'échelles d'évaluation.....	86
3.4.2.1. Les échelles nominales .....	87
3.4.2.2. Les échelles ordinales.....	87
3.4.2.3. Les échelles de proportionnalité.....	88
3.4.2.4. Les notes des éléments des échelles d'évaluation.....	88
3.4.2.5. Le sens de lecture des échelles.....	89
3.4.2.6. Conclusion sur les échelles de cotation.....	90
3.4.3. Conclusion sur l'ensemble des critères.....	90
<b>3.5. LES EXPERTS</b>	<b>90</b>
3.5.1. La typologie des experts mobilisés .....	90
3.5.2. Les experts de construction.....	91
3.5.2.1. Les experts de confrontation.....	91
3.5.2.2. Les experts de cotation .....	91
3.5.2.3. Discussion à propos des catégories d'experts .....	91
3.5.2.4. La collecte des avis d'experts .....	92
3.5.3. Les experts interrogés .....	93
<b>3.6. L'AGREGATION</b>	<b>94</b>
3.6.1. L'agrégation des avis d'experts .....	94
3.6.1.1. L'agrégation des jugements individuels (AIJ) .....	94
3.6.1.2. L'agrégation des poids relatifs individuels (AIP) .....	95
3.6.1.3. La méthode Delphi .....	95
3.6.1.4. Discussion à propos des différentes solutions d'agrégations .....	96
<b>3.7. CALCUL DES NOTES FINALES POUR CHACUNE DES DIMENSIONS</b>	<b>97</b>
<b>3.8. ANALYSE DES RESULTATS</b>	<b>97</b>
3.8.1. Les représentations graphiques des résultats .....	97
3.8.2. Analyses de sensibilité.....	99
<b>3.9. DISCUSSION</b>	<b>100</b>

## INTRODUCTION

Le *Chapitre 1*, intitulé « contexte et enjeux », met en évidence les cinq dimensions étudiées dans le cadre des travaux de thèse. Il s'agit, pour rappel, des dimensions économique, réglementaire, environnementale, territoriale et technique. Pour chacune des dimensions, l'objectif était de rechercher, d'adapter, de construire et de pondérer des critères afin d'apporter une aide à l'arbitrage au gestionnaire de déchets. Le référentiel proposé a été conçu à partir de cinq étapes fondamentales :

- la recherche et l'identification de critères pertinents. Cette première étape était effectuée à partir de la bibliographie et des propositions **des experts de construction**,
- le choix d'une méthode multicritères d'aide à la décision (cf. *Chapitre 2*),
- la construction des critères retenus avec le soutien des experts de construction et les avis **des experts de confrontation**. Cette étape intègre la création d'une échelle d'évaluation pour chacun des critères où les différents niveaux ont été soumis et évalués par **des experts de cotation**,
- de tester le modèle proposé sur le cas des déchets amiantés,
- de confirmer le modèle sur les autres déchets étudiés.

Ce chapitre présente les démarches employées pour répondre aux questionnements suivants :

- comment intégrer dans le modèle, les critères retenus (qualitatifs et quantitatifs) ayant des unités de mesure différentes. Comment construire les échelles d'évaluation des différents critères retenus.
- quels sont les profils d'experts à mobiliser ? Comment les questionner et intégrer leurs avis. Comment prendre en compte des avis divergents.
- comment visualiser et interpréter les résultats issus des évaluations et des phases de comparaison.

La *Figure 29*, ci-après, résume l'ensemble des étapes de la méthodologie employée.

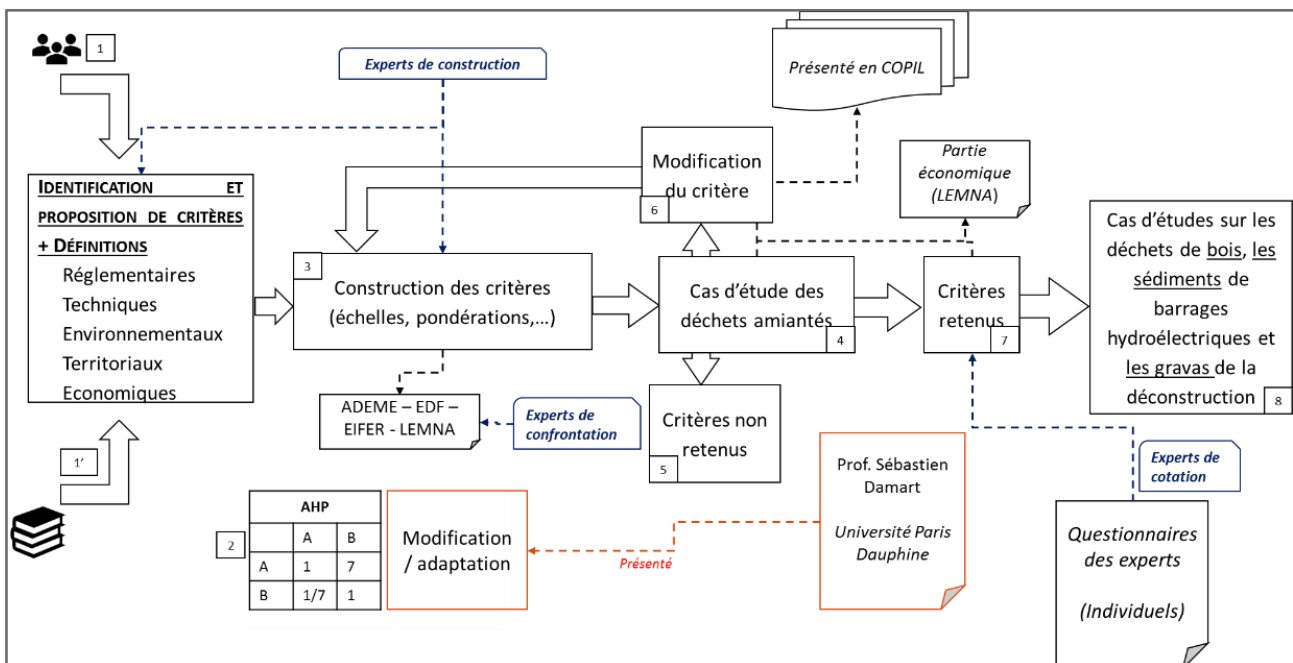


Figure 29 : Méthodologie « recherche – action » pour la construction du modèle

Tout d'abord, les premières étapes correspondent respectivement à la définition des dimensions étudiées et à l'identification des critères pertinents. Ces deux étapes ont été réalisées, simultanément, via les propositions des experts de construction [1] et la revue de la littérature (cf. §*Chapitre 2*) [1'].

La deuxième étape [2] correspond à l'adaptation et à l'utilisation de la méthode d'analyse multicritères, **Analytic Hierarchy Process (AHP)**. Les modifications et les adaptations que nous avons faites ont été présentées à Sébastien DAMART (*Annexe 3.1*) de l'Université Paris Dauphine. Cette institution est particulièrement reconnue par la communauté scientifique pour ses études portant sur les méthodes multicritères d'aide à la décision.

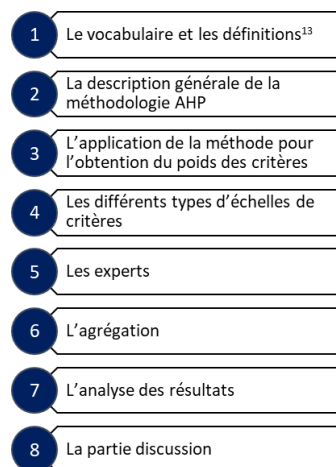
La troisième étape [3] correspond à la construction de l'ensemble des critères retenus. Il s'agit principalement de les choisir et de mettre au point les échelles d'évaluation pour chacun des critères. Nous avons ensuite testé notre modèle sur le cas des déchets amiantés [4]. Cette partie des travaux qui a été réalisée avec l'aide des experts de construction et de confrontation a permis suivant les cas :

- d'abandonner le critère [5],
- de valider le critère, mais avec une modification de la structure [6],
- de valider le critère [7].

Les critères validés [7] ont été présentés aux experts de cotation, qui ont établi les pondérations des différents niveaux des échelles d'évaluation. Pour cela, nous avons envoyé un questionnaire individuel à plusieurs experts, reconnus dans la gestion des déchets et/ou dans leur domaine de compétence. En outre, ces derniers ont établi les poids des critères entre eux pour chacun des domaines et les notes des éléments constituant les échelles d'évaluation. À la suite, un cas d'étude complet a été réalisé sur les déchets amiantés suivis, de plusieurs cas d'étude sur les déchets de bois [8], les sédiments et les gravats de la déconstruction.

Pour finir cette partie introductive des différentes étapes méthodologiques, il est intéressant de noter que l'ensemble des travaux a régulièrement été suivi par le comité de pilotage et présenté à plusieurs reprises aux laboratoires de recherche LEMNA, CREIDD et TEC. De plus, dans le cadre d'une démarche industrielle, plusieurs échanges ont eu lieu avec des services EDF, avec l'ADEME et avec l'association RECORD. La présentation des travaux à ces entités correspond à des étapes de confrontation qui ont, notamment, permis de recueillir les remarques d'experts n'ayant pas participé à la construction générale de notre modèle et sur les choix effectués. Ces différentes étapes, décrites ci-dessus, mettent en évidence une démarche « recherche-action » que nous avons utilisée pendant la durée des travaux de thèse.

L'objectif de ce chapitre est de décrire de façon plus détaillée l'ensemble d'étapes énoncées ci-dessus suivant la structure suivante :



---

<sup>13</sup> La première partie précise le vocabulaire employé et présente les définitions retenues. Il s'agit, d'apporter une clarification sur le vocabulaire couramment utilisé lors de la mise en place d'une méthode d'analyse multicritères. Cette description du vocabulaire est suivie des définitions que nous avons choisies de retenir pour les dimensions étudiées. Enfin, nous énonçons les différentes catégories d'expertises citées dans les paragraphes ci-dessus (construction, cotation, confrontation) qui sont intervenus pendant les travaux de recherche.

### 3.1. LE VOCABULAIRE ET LES DEFINITIONS

Pour orienter un déchet vers une voie de valorisation (ou d'élimination), le gestionnaire de déchet doit faire un choix en conjuguant plusieurs dimensions. Dans notre contexte, la gestion des déchets industriels, nous avons choisi d'en retenir cinq (cf. *Chapitre 1*) à savoir, les dimensions économique réglementaire, territoriale, environnementale, et technique. Cette démarche doit contribuer et aider les gestionnaires de déchets à choisir entre différentes installations de valorisation, en se basant sur une analyse complète et élaborée.

Nous avons dans un premier temps, à partir d'entretiens individuels et collectifs et via la bibliographie, défini chacune des dimensions. Cette étape, nécessaire et indispensable, permet d'établir les frontières du système étudié et de préciser les éléments qui le composent, afin de répondre au mieux à notre besoin. Ces définitions ont été affinées au fur et à mesure de l'avancement des travaux. Toutefois, avant de les présenter nous précisons, dans un premier temps, le vocabulaire couramment employé lors de l'utilisation de méthodes multicritères d'aide à la décision.

#### 3.1.1. Le vocabulaire couramment employé lors de l'utilisation d'analyse multicritères

Pour obtenir les notes et les poids des critères, nous avons choisi d'utiliser une méthode multicritères d'aide à la décision, Analytic Hierarchy Process (AHP) (cf. §3.2). Le *Tableau 34* énonce le vocabulaire couramment employé lors de l'utilisation de méthode multicritères. En effet, il existe une diversité de définitions des termes employés tels que critère, indicateur, alternative, actions. En conséquence, il semble pertinent d'apporter une clarification sur les définitions que nous avons choisi d'adopter.

*Tableau 34 : Terminologie*

TERMINOLOGIE	DESCRIPTION
Les méthodes d'aide à la décision multicritères	Elles font référence à un ensemble de méthodologies permettant l'agrégation de critères afin d'aider un décideur à choisir une solution parmi plusieurs actions ou alternatives (cf. §2.3.1).
Alternative/Action	le terme alternative est un terme générique qui est employé dans cette thèse selon l'usage qui en est fait en langue anglaise, et qui s'impose parfois en français. Une alternative est un choix d'action possible parmi plusieurs. Dans notre contexte, l'objet du choix porte sur les installations de traitement des déchets.
Critères	Un critère permet de comparer des solutions distinctes (ici les installations de gestion de déchets). Il est composé d'une échelle de cotation qui permet une évaluation de la performance, selon un point de vue quantitatif ou qualitatif, d'une action à atteindre un objectif.
Famille de critères	Une famille de critères regroupe un ensemble de critères portant sur la même thématique (ici, appelée dimension).
Échelle de cotation	Elle peut être appelée échelle d'évaluation. C'est l'ensemble des valeurs que peut prendre un critère. Elle permet d'évaluer les installations sur les critères, pour ensuite les comparer.
Note	Elle traduit la position d'une l'installation évaluée sur l'échelle de cotation.
Poids	Le poids d'un critère traduit l'importance que les experts lui accordent, parmi l'ensemble des critères de la famille retenue.
Score	C'est la pondération de la note par le poids du critère.
Note globale	La note globale, ou note unique est l'agrégation des scores qu'une installation a obtenus sur l'ensemble des critères d'une dimension. Dans le cadre de nos travaux, chaque installation est évaluée sur chacune des dimensions. Ainsi, la performance de cette dernière est traduite par cinq notes globales.

#### 3.1.2. Les définitions des dimensions

La définition des dimensions étudiées a été construite en s'inspirant des travaux de la littérature scientifique afin qu'elles répondent à notre contexte. En effet, des mots clés ont été identifiés préalablement à la revue de littérature. Les définitions sont composées de ces mots clés identifiés ci-après selon la typologie suivante :

- les mots clés soulignés font référence à des données ou des variables,
- les mots clés en caractère gras et souligné représentent les critères de la dimension.

Dans le cadre de la thèse, les dimensions ont été définies comme suit :

### 3.1.2.1. La dimension réglementaire

La dimension réglementaire correspond aux règles qui classifient, caractérisent, donnent **des objectifs**, déterminent la nature, la dangerosité du déchet et précisent **la responsabilité du producteur**. Elle comprend également les règles inhérentes aux filières de gestion de déchets pour **le respect de la hiérarchie des modes de gestion**, la réglementation concernant le transport et **le principe de proximité**, les réglementations spécifiques des déchets et aux réglementations ICPE (dont seuils). De plus, elle intègre des normes et des guides qui font office de réglementation quand celle-ci est absente (règles de l'art).

### 3.1.2.2. La dimension économique

La dimension économique est l'étude des forces économiques présentes sur le marché de la valorisation des déchets. Cette analyse est réalisée à partir de la démarche de Porter<sup>[169]</sup> où l'on considère **le coût d'utilisation de la filière**, **l'intensité de la demande** et **l'intensité concurrentielle**. Cette thématique couvre les différents types de coûts, mais aussi les recettes éventuelles liées à la revente des déchets. Ces coûts sont évidemment spécifiques à chaque filière/installation. Le transport depuis le lieu de production vers la filière est dépendant des régions de gestion (distance) et des caractéristiques du déchet.

### 3.1.2.3. La dimension technique

La dimension technique correspond à l'adéquation entre les caractéristiques intrinsèques du déchet (description fine du déchet, sa nature, sa quantité) et les **critères d'entrée** dans les différentes installations de traitement de fin de vie. Ces dernières peuvent être des voies **pérennes** (utilisées depuis longtemps), mais avec **des capacités de traitement** et **d'adaptabilité** qui leur sont propres. De plus, certaines d'entre elles permettent de fournir **une matière première secondaire répondant à des spécifications** pouvant entrer dans la composition de plusieurs **produits**.

### 3.1.2.4. La dimension territoriale

Le territoire est un espace géographique dans lequel se fait **l'interaction (intra ou extra territoriale)** entre l'entité productrice et l'installation de gestion de déchets. Cette interaction dépend des spécificités propres à chaque territoire, notamment les **infrastructures de transports** et les **leviers pour inciter** les producteurs de déchets à les valoriser localement. Une **utilisation locale** du déchet valorisé est création de valeur pour ce territoire, elle participe à **l'emploi** et engendre et/ou conforte de nouvelles relations territoriales.

### 3.1.2.5. La dimension environnementale

La dimension environnementale comprend la caractérisation environnementale du déchet et de ses impacts selon les installations envisagées. Les **impacts environnementaux réglementés** des installations sont des impacts acceptés et encadrés par le respect des arrêtés d'exploitation<sup>14</sup>. Les impacts environnementaux des installations sont étudiés en s'inspirant des principes de la méthodologie ACV. Les installations sont alors comparées par rapport à leur contribution au **changement climatique, à l'économie de ressources vierges, à la consommation en eau et en énergie**.

Comme vu au *Chapitre 2*, la méthode multicritères retenue qui correspond le mieux à notre problématique est est la méthode AHP. Nous proposons de la décrire de manière détaillée dans la partie ci-après.

---

<sup>14</sup> Cette prise de position a été proposée et validée par un expert de construction, EDF1 (Expert Management durable des déchets industriels).

### 3.2. DESCRIPTION GENERALE DE LA METHODOLOGIE AHP

Analytic Hierarchy Process (AHP) est la méthode choisie, qui doit permettre de hiérarchiser les installations potentielles de gestion des déchets. Cette méthode, introduite par le professeur *Thomas L. Saaty*, propose de résoudre un problème de décision complexe en le décomposant en une structure hiérarchique<sup>[129], [170]</sup>. Ce raisonnement permet de décomposer, de juger et de synthétiser un problème<sup>[171]</sup>. La méthode se compose des quatre étapes suivantes :

#### Étape 1 :

La première étape consiste à décomposer le problème complexe et non structuré en structure hiérarchique. Cette représentation permet de structurer des éléments constituants sous la forme d'un arbre hiérarchique composé de plusieurs niveaux. La construction s'opère selon une démarche descendante ainsi, le premier niveau correspond à l'objectif global de la problématique, le second niveau correspond aux familles de critère (ici nos dimensions), le troisième niveau précise les critères et enfin, le niveau inférieur représente les alternatives (*Figure 30*).

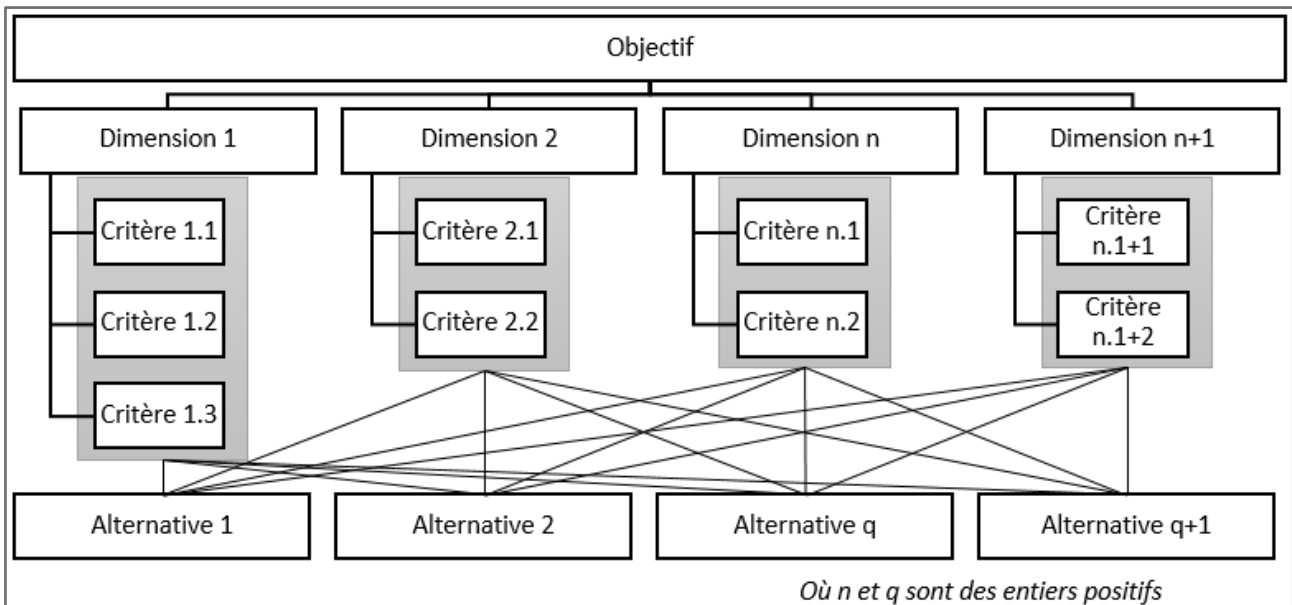


Figure 30 : Exemple de modèle hiérarchique AHP

Il est important de préciser qu'il peut exister plusieurs sous-niveaux entre le niveau trois et la base, en fonction de l'existence de sous-critères. En résumé, le problème de départ est décomposé en sous-problèmes plus faciles à appréhender et qui peuvent être étudiés de manière indépendante.

#### Étape 2 :

Il s'agit pour la seconde étape d'établir l'importance relative des éléments composant la structure hiérarchique. Cette étape permet d'attribuer un poids à chaque critère et sous-critères de la structure hiérarchique. Pour ce faire la méthode AHP propose, via une échelle de jugement créée également par *Saaty* (*Tableau 35*), de transformer l'avis (sa préférence issue de son expérience) de l'expert en valeur numérique<sup>[129]</sup>.

Il s'agit de comparer les critères (et sous-critères s'il y a lieu) deux à deux en se posant la question :

Le critère « Ca » est-il plus important, mieux, ou domine-t-il le critère « Cb » ? Et si oui, dans quelle mesure ?

Les préférences exprimées sont consignées dans une matrice de comparaison carrée et réciproque de dimension  $n$  (où  $n$  correspond au nombre de critères).



Tableau 35 : Échelle de Saaty de la méthode AHP

ÉCHELLES VERBALES	ÉCHELLES NUMERIQUES	COMMENTAIRES
Les deux éléments sont égaux	1	Deux éléments contribuent autant à la propriété
L'élément domine modérément l'autre	3	L'expérience et l'appréciation personnelles favorisent légèrement un élément par rapport à un autre
L'élément domine l'autre	5	L'expérience et l'appréciation personnelles favorisent fortement un élément par rapport à un autre
L'élément domine très fortement l'autre	7	Un élément est fortement favorisé et sa dominance est attestée dans la pratique
L'élément est absolument dominant	9	Les preuves favorisant un élément par rapport à un autre sont aussi convaincantes que possible.
Les valeurs intermédiaires (2, 4, 6, 8) peuvent être utilisées pour affiner le jugement		

### Étape 3 :

Le poids spécifique des différents critères se déduit de la normalisation de la matrice de comparaison. Pour cela, il faut faire la somme des valeurs de chaque colonne de la matrice, diviser chaque élément de la matrice pour le total de sa colonne et ensuite calculer la moyenne de la ligne. Ces moyennes donnent le poids relatif de chacun des éléments. Plus le résultat est proche de 1, plus l'élément est important.

### Étape 4 :

La dernière étape consiste à agréger les résultats des critères et des sous-critères. Les poids finaux sont calculés de proche en proche en agrégeant par une somme pondérée les poids du niveau courant, pondérés par les poids du niveau supérieur.

Cette méthode propose de fragmenter le processus de décision en niveaux où pour chacun d'eux, l'expert est capable de hiérarchiser ses choix à partir d'une comparaison deux à deux des éléments. Ensuite, l'algorithme d'AHP synthétise les préférences fournies par l'expert en classements. Cette méthode offre une flexibilité permettant en cas de modifications portant sur des critères de ne pas remettre en cause la structure hiérarchique générale. De plus, la méthode donne notamment la possibilité d'agréger des critères qualitatifs et quantitatifs<sup>[172]</sup>.

La partie suivante propose un exemple d'application de la méthode pour obtenir l'importance des critères.

## 3.3. APPLICATION DE LA METHODE POUR L'OBTENTION DU POIDS DES CRITÈRES

Certains critères ont plus d'importance et pèsent plus dans la décision finale. Pour aider l'expert à identifier les critères importants et déterminer leur poids les uns par rapport aux autres, nous nous sommes appuyés sur la méthode exposée au point précédent. Les poids des critères ont été obtenus à partir des avis des experts de cotation.

Pour illustrer le fonctionnement de la méthode, nous proposons un exemple sur la dimension réglementaire de notre étude. Dans celui-ci, il s'agit de présenter les différentes étapes de la méthode pour obtenir la pondération des quatre critères composant la dimension réglementaire (cf. *Chapitre 4*). La structure hiérarchique est présentée ci-dessous (*Figure 31*).

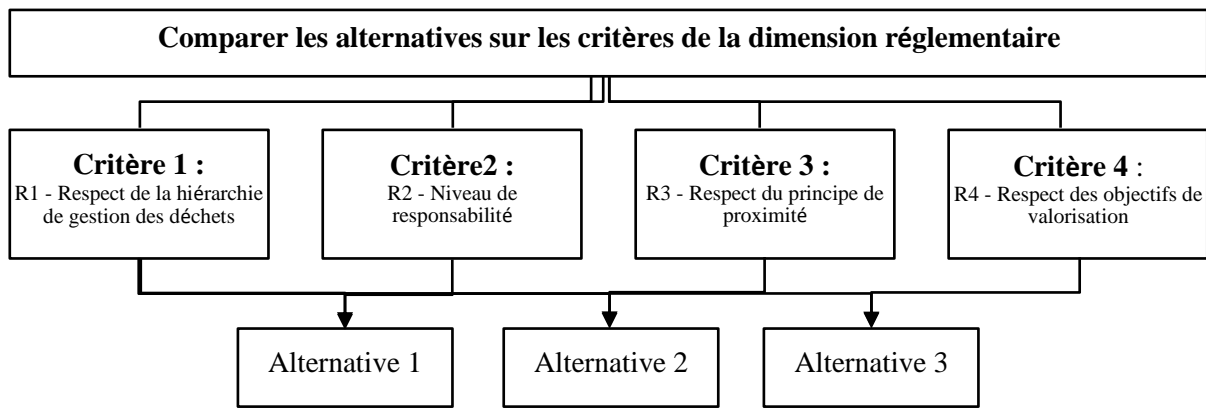


Figure 31 : Structure hiérarchique de la dimension réglementaire

### Étape 1 :

La dimension réglementaire est composée de quatre critères (Tableau 36).

Tableau 36 : Critères de la dimension réglementaire (exemple pour décrire le fonctionnement de la méthode)

CRITERES DE LA DIMENSION REGLEMENTAIRE	POIDS
R <sub>1</sub> — Respect de la hiérarchie de gestion des déchets	A
R <sub>2</sub> — Niveau de responsabilité du producteur	B
R <sub>3</sub> — Respect du principe de proximité	C
R <sub>4</sub> — Positionnement de la gestion par rapport aux objectifs de valorisation	D

### Étape 2 :

La seconde étape consiste à représenter les critères dans une matrice de comparaison (Tableau 37). Les préférences inscrites dans cette matrice carrée de dimension quatre (dans notre exemple) sont fictives.

Tableau 37 : Matrice de comparaison

	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	R <sub>4</sub>
R <sub>1</sub>	1	7	5	5
R <sub>2</sub>	1/7	1	1/5	1/7
R <sub>3</sub>	1/5	5	1	1/3
R <sub>4</sub>	1/5	7	3	1

Il s'agit ensuite de comparer les critères deux à deux (l'élément en ligne par rapport à l'élément en colonne) **uniquement dans les cases vertes** (Tableau 37) et de traduire **son jugement avec l'échelle de Saaty**. Si l'élément en ligne est plus important que celui en colonne, alors il convient d'utiliser les valeurs numériques (X) selon l'échelle de Saaty (Tableau 35), sinon il faut inverser la valeur souhaitée (1/X). Dans cet exemple, l'expert doit effectuer six comparaisons.

Exemple de questionnement : *Est-ce que le critère R<sub>1</sub> est plus important que le critère R<sub>2</sub>, et dans quelle mesure ?*

Au regard des jugements portés dans la matrice de comparaison (Tableau 37), l'expert a jugé que le critère R<sub>1</sub> domine très fortement (indice 7), c'est-à-dire qu'il est beaucoup plus important que, le critère R<sub>2</sub>.

Il faut appliquer la même démarche pour chacune des intersections ligne-colonne, représentées par des cases vertes dans le tableau ci-dessus. Il est à noter qu'un critère est toujours égal à lui-même, ainsi le critère R<sub>1</sub> est aussi important que le critère R<sub>1</sub> (case de couleur grise). On rappelle également que la matrice est réciproque.



Par exemple, si la comparaison entre les critères R<sub>1</sub> et R<sub>2</sub> a donné une valeur de 7 dans les cases vertes alors, la comparaison entre les critères R<sub>2</sub> et R<sub>1</sub> donne 1/7 (cases bleues).

On remarque que le nombre de comparaisons à effectuer est égal à  $\frac{n.(n-1)}{2}$ , où n représente le nombre d'éléments.

**Étape 3 :**

Une fois cette étape terminée et que tous les critères de la dimension sont comparés il faut normaliser la matrice. Pour cela, il faut faire la somme des valeurs de chaque colonne de la matrice, diviser chaque élément de la matrice pour le total de sa colonne (*Tableau 38*). Cette étape est représentée par la couleur « saumon » dans la matrice ci-dessous.

*Tableau 38 : Exemple normalisation de la matrice de comparaison et poids des critères*

	R1	R2	R3	R4	
R <sub>1</sub>	1	7	5	3	
R <sub>2</sub>	1/7	1	1/5	1/7	
R <sub>3</sub>	1/5	5	1	1/3	
R <sub>4</sub>	1/3	7	3	1	
TOTAL	1,68	20,00	9,20	4,48	POIDS RELATIFS
R <sub>1</sub>	0,60	0,35	0,54	0,67	0,54
R <sub>2</sub>	0,09	0,05	0,02	0,03	0,05
R <sub>3</sub>	0,12	0,25	0,11	0,07	0,14
R <sub>4</sub>	0,20	0,35	0,33	0,22	0,27

Enfin, il s'agit de calculer la moyenne de chaque ligne pour obtenir le poids relatif des critères. Les poids relatifs des quatre critères de notre exemple sont présentés dans *Tableau 39* ci-dessous :

*Tableau 39 : Exemple des poids des critères de la dimension réglementaire*

CRITERES DE LA DIMENSION REGLEMENTAIRE	POIDS
R <sub>1</sub> — Le respect de la hiérarchie de gestion des déchets	0,54
R <sub>2</sub> — Le niveau de responsabilité du producteur	0,05
R <sub>3</sub> — Le respect du principe de proximité	0,14
R <sub>4</sub> — Le positionnement de la gestion par rapport aux objectifs de valorisation	0,27

Il convient de préciser que les poids sont toujours compris entre 0 et 1 et que leur somme est égale à 1.

Nous avons utilisé la méthodologie développée par Saaty pour obtenir les **poids relatifs des critères** de chaque dimension. Les critères sont également composés de plusieurs éléments, appelés **échelle de cotation ou d'évaluation**. Ces dernières sont les différentes valeurs que peut prendre un critère. Par exemple, la *Figure 32* ci-après, illustre les échelles de chaque critère de la dimension réglementaire.

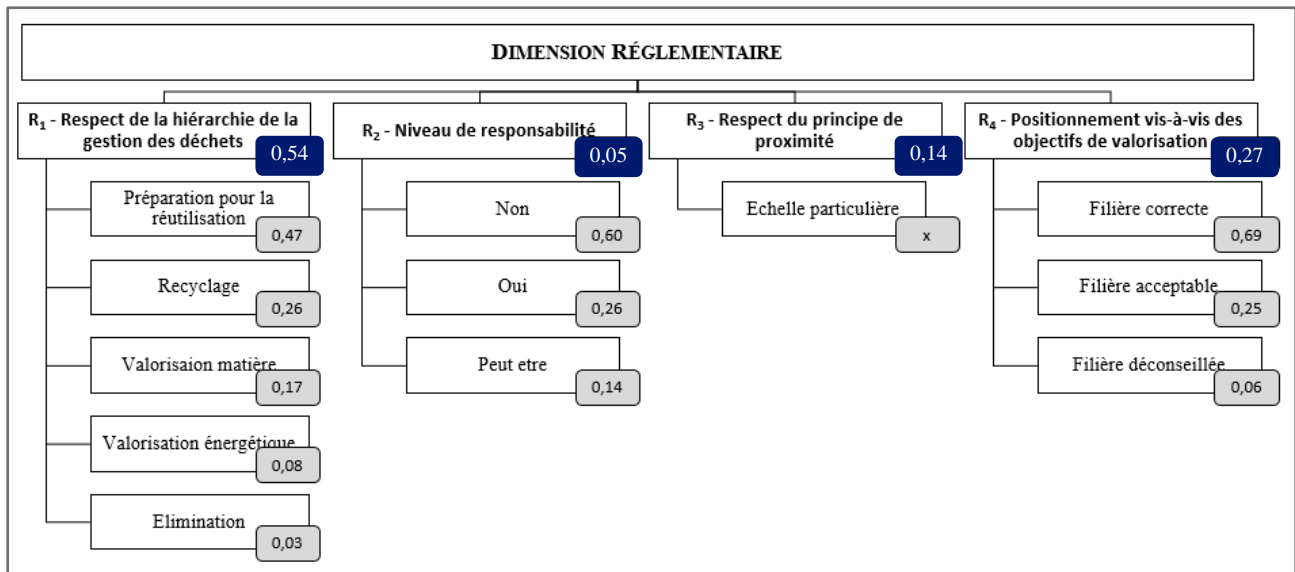


Figure 32 : Les échelles de la dimension réglementaire

Nous avons différents types d'échelles, des échelles nominales, ordonnées, ou encore de ratio. Ces dernières sont composées entre 2 et une infinité d'éléments. Nous avons alors décidé d'utiliser la méthode AHP pour obtenir l'importance de chaque élément composant les échelles d'évaluation. Cette méthode a l'avantage de pouvoir être utilisée quel que soit le nombre d'éléments à pondérer. Néanmoins, la variabilité de construction des échelles de cotation a nécessité des adaptations de la méthode sur la façon d'obtenir les pondérations des éléments constituant ces échelles.

Nous proposons dans la partie suivante de présenter les différentes échelles de cotation puis, au travers d'un exemple, l'application de la méthodologie AHP pour noter<sup>15</sup> les éléments constituant les échelles d'évaluation.

### 3.4. LES DIFFERENTS TYPES D'ECHELLES DE CRITÈRES

Le concept de « critère » joue un rôle fondamental sur l'évaluation des différentes alternatives et doit par conséquent respecter un certain nombre de règles. Ces dernières sont précisées dans la partie ci-dessous.

#### 3.4.1. Le cahier des charges préalable à la construction du modèle

Un critère doit être **utile** afin de comparer différentes solutions puis les hiérarchiser à partir d'une échelle d'évaluation et **fiable** afin de donner le résultat le plus pertinent (proche de la réalité).

La mise en place d'une analyse multicritères nécessite de respecter plusieurs conditions. Tout d'abord, les critères d'une même thématique sont assemblés généralement en « **une famille cohérente de critères** ». Celle-ci doit répondre aux exigences ci-dessous :

1. **Exhaustivité** : Il faut considérer l'ensemble du problème. Il ne faut pas qu'il y ait trop peu de critères, au risque de perdre de l'information<sub>[133], [173]</sub>.
2. **Cohérence** : les critères doivent être cohérents avec la problématique<sub>[133]</sub>.
3. **Non-redondance** : il s'agit d'éviter de répéter des critères ayant la même finalité/objectif<sub>[122], [133], [173]</sub>.
4. **Pertinence** : rendre compte fidèlement des points de vue qui entrent dans la problématique décisionnelle et être utile à la prise de décision. Marion PERSONNE précise que pour valider la pertinence, un critère doit répondre à un besoin, être lié à un objectif, être lisible (simplicité

<sup>15</sup> Pour faciliter la lecture, la compréhension de la méthodologie et la distinction entre les différents éléments pondérés, le terme poids est utilisé pour l'importance des critères. Le terme note désigne l'importance des éléments constituant les échelles de cotation.

d'interprétation et de compréhension, non-ambiguïté) et il doit exister un consensus des parties intéressées pour valider le critère<sup>[174]</sup>.

5. **Clarté** : être simple et facilement compréhensible afin qu'il puisse être compris, interprété et communiqué clairement et de la même manière par tous les différents acteurs de la prise de décision ; même si certains ne sont pas considérés comme des experts du sujet.
6. **Accessibilité** : être mesurable de manière simple (délai d'acquisition des données raisonnable) par des techniques vérifiables et stable dans le temps. La fonctionnalité d'un critère/indicateur dépend de la disponibilité des données et de la capacité à les collecter.

Les familles de critères retenus (*Tableau 40*) correspondent aux cinq dimensions étudiées dans le cadre de nos travaux de thèse (cf. *Chapitre 1*).

*Tableau 40 : Les 5 familles de critères*

FAMILLE 1 (REGLEMENTAIRE)	FAMILLE 2 (ÉCONOMIE)	FAMILLE 3 (TECHNIQUE)	FAMILLE 4 (ENVIRONNEMENT)	FAMILLE 5 (TERRITOIRE)
R <sub>1</sub> — Respect de la hiérarchie de la gestion des déchets	Ec <sub>1</sub> — Coût d'utilisation de l'installation	T <sub>1</sub> — Pérennité de l'installation	Env <sub>1</sub> — Impacts environnementaux réglementés	Ter <sub>1</sub> — Favoriser l'économie locale (entrée dans la l'installation)
R <sub>2</sub> — Niveau de responsabilité	Ec <sub>2</sub> — Intensité concurrentielle	T <sub>2</sub> — Adéquation du déchet en entrée d'installation (Encadrement)	Env <sub>2</sub> — Impact sur le changement climatique	Ter <sub>2</sub> — Utilisation locale de la ressource (en sortie d'installation)
R <sub>3</sub> — Respect du principe de proximité	Ec <sub>3</sub> — Intensité de la demande	T <sub>3</sub> — Adéquation du produit dans une filière (encadrement)	Env <sub>3</sub> — Économie de ressources vierges	Ter <sub>3</sub> — Capacité à transporter le déchet sur le territoire
R <sub>4</sub> — Positionnement vis-à-vis des objectifs de valorisation		T <sub>4</sub> — Multiplicité d'utilisation du produit	Env <sub>4</sub> — Consommation en eau	Ter <sub>4</sub> — Emploi
		T <sub>5</sub> — Capacité d'absorption annuelle de l'installation	Env <sub>5</sub> — Consommation d'énergie	Ter <sub>5</sub> — Incitations locales (politique, économique, réglementaire)
		T <sub>6</sub> — Flexibilité d'absorption de l'installation		

Un critère permet une évaluation quantitative ou qualitative d'une action à atteindre un objectif. Pour cela, une échelle de cotation (ou d'évaluation) est associée à chacun d'eux. Celle-ci permet de mesurer la performance des alternatives (dans notre contexte les installations de gestion de déchets) sur le critère. Une présentation de différents types de construction utilisés est décrite dans les parties ci-dessous.

### 3.4.2. Les différents types de construction d'échelles d'évaluation

Une échelle de cotation (ou d'évaluation) est constituée d'un ensemble d'éléments possibles (qualitatifs ou quantitatifs) afin de mesurer la performance des éléments évalués (ici, des installations de gestion de déchets) sur le critère. Ces échelles peuvent dépendre de paramètres physiques (distances, émissions, quantité, etc.), mais aussi de paramètres plus abstraits (des coûts) et qualitatifs (le respect de la hiérarchie de gestion des déchets). Les travaux de *Stevens* portant sur les caractéristiques des échelles<sup>[175]</sup> ont permis à *Mammeri* de définir cinq types d'échelles<sup>[133]</sup> (*Tableau 41*).

Tableau 41 : Les différents types d'échelles de critères

TYPES D'ECHELLES	DESCRIPTION
Échelle nominale	Ce sont des échelles qui permettent un classement exclusif. <i>Ex. : le genre masculin ou féminin ou répondre par oui ou non.</i>
Échelle ordinale	Ce type d'échelle repose sur le rang. Elle est définie par un ensemble de valeur avec un minimal et un maximal. Les éléments sont ordonnés. <i>Ex. : l'échelle de dureté des minéraux.</i>
Échelle d'intervalle	Échelle ordinale à laquelle on donne sens à la caractéristique l'écart unitaire. L'espace entre les éléments de l'échelle est linéaire. De plus la caractéristique d'origine n'est pas respectée. <i>Ex. : la température en degré Celsius, où 0 °C ne signifie pas une absence de température.</i>
Échelle de proportionnalité	Échelle d'intervalle à laquelle est associée une caractéristique d'origine. La température, exprimée en degré Kelvin avec un zéro absolu, la masse ou le prix d'un bien. <i>Ex. : le nombre d'heures d'études pour un examen est mesuré à l'aide d'une échelle de proportionnalité parce que zéro heure d'étude correspond à une absence d'étude.</i>
Échelle absolue	C'est une échelle de ratio où, il n'existe qu'une seule information, il n'y a donc pas de comparaison « directe ». <i>Ex. : le nombre d'habitants dans une ville vérifie la caractéristique d'origine : on peut dire qu'il y a trois fois plus d'habitants dans une ville que dans une autre, mais toute transformation de ce nombre n'aurait aucun sens puisque l'on perdrait la signification de l'information. L'information ne peut pas être sortie du contexte.</i>

### 3.4.2.1. Les échelles nominales

Ces échelles sont des échelles qualitatives et leur construction repose sur un nombre d'éléments non numériques finis. Par exemple, dans notre contexte le *Tableau 42* précise l'échelle de cotation du critère **R<sub>1</sub> — Le respect de la hiérarchie de gestion des déchets**. Elle est composée de 5 éléments représentant les différents niveaux de la hiérarchie de gestion des déchets. Lors de l'évaluation d'une installation de gestion de déchets sur ce critère, la position d'une installation ne peut être qu'une des cinq propositions.

Tableau 42 : Exemple d'une échelle nominale, ici l'échelle du critère R1 — respect de la hiérarchie de gestion des déchets

NIVEAU DE LA HIERARCHIE	PREPARATION EN VUE DE LA REUTILISATION	RECYCLAGE	VALORISATION MATIERE	VALORISATION ENERGETIQUE	ÉLIMINATION

### 3.4.2.2. Les échelles ordinales

Les échelles ordinales reposent également sur un nombre d'éléments finis. Par principe, ces échelles sont construites à partir de valeurs numériques ordonnées (*Tableau 43*), mais ne respectent pas les caractéristiques de proportionnalité et d'origine<sup>16</sup>.

Tableau 43 : Exemple d'une échelle ordinale

ANCIENNETE D'UNE VOITURE	+ DE 300 000 KILOMETRES	MOINS 20 000 KILOMETRES	MOINS DE 1 000 KILOMETRES
Données à utiliser	Pour répondre à ce critère, la donnée à utiliser est obligatoirement quantitative (ici, un nombre de kilomètres parcouru)		

Les échelles ordinales peuvent également être bâties à partir d'éléments qualitatifs, mais à la condition que la donnée d'entrée utilisée soit quantitative (*Tableau 44*)<sup>17</sup>. Le *Tableau 44* donne l'exemple d'une échelle qualitative avec une donnée d'entrée quantitative afin d'évaluer l'ancienneté d'une voiture.

<sup>16</sup> Par exemple, un coureur qui est arrivé en première place lors d'un marathon n'a pas obligatoirement couru deux fois plus vite que celui qui est arrivé second. Il n'y a donc pas obligatoirement de proportionnalité entre les éléments de l'échelle.

<sup>17</sup> Lorsqu'on associe une échelle chiffrée à une mesure qualitative, il ne s'agit pas d'une véritable échelle quantitative, mais plutôt d'une échelle pseudo-quantitative ou mixte. Nous qualifierons ici ce genre d'échelle de pseudo-quantitative.

Tableau 44 : Exemple d'une échelle ordinale pseudo-quantitative

ANCIENNETE D'UNE VOITURE	VIEILLE	RECENTE	NEUVE
Exemple de données d'entrée à utiliser	300 000 kilomètres	18 000 kilomètres	250 kilomètres

Il s'agit donc d'une forme d'échelle qualitative qui associe une donnée chiffrée. Il est important de définir précisément la donnée d'entrée à utiliser afin de classer correctement et sans ambiguïté l'élément à comparer. Il s'agit de définir au préalable ce que l'on entend par une voiture vieille, récente et neuve.

Par exemple, dans notre contexte le *Tableau 45* précise l'échelle de cotation du critère  $T_1$  — **Pérennité de l'installation**. Elle est composée de 4 éléments numériques ordonnés. Lors de l'évaluation d'une installation de gestion de déchets sur ce critère, le positionnement d'une installation ne peut être que l'une des quatre propositions de l'échelle d'évaluation.

Tableau 45 : Exemple d'une échelle ordinale, ici l'échelle du critère  $T_1$  — Pérennité

PERENNITE DE L'INSTALLATION	$\geq 10$ ANS	$\geq 5$ ANS	$\leq 3$ AN	$\leq 1$ AN
-----------------------------	---------------	--------------	-------------	-------------

**La méthodologie pour obtenir les poids relatifs des différents éléments de l'échelle est la même que celle utilisée pour l'obtention des poids des critères (cf. §3.3).**

### 3.4.2.3. Les échelles de proportionnalité

Ces échelles de cotation sont construites uniquement à partir d'éléments quantitatifs. On les distingue par leurs caractéristiques de linéarité et d'origine (0 non arbitraire). L'âge, la distance, le poids ou le volume sont des exemples de mesures par ratio puisque le 0 est naturel et à une importance dans l'établissement des niveaux de l'échelle<sup>18</sup>.

Tableau 46 : Exemple d'une échelle de proportionnalité

DUREE D'UN EXAMEN (MIN)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	$\geq 100$
-------------------------	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	------------

### 3.4.2.4. Les notes des éléments des échelles d'évaluation

Nous proposons dans cette partie de visualiser une échelle de critère complète à travers 3 exemples.

#### Les échelles nominales

Tableau 47 :  $R_1$  — respect de la hiérarchie de gestion des déchets

NIVEAU DE LA HIERARCHIE	PREPARATION EN VUE DE LA REUTILISATION	RECYCLAGE	VALORISATION MATIERE	VALORISATION ENERGETIQUE	ÉLIMINATION
NOTES	$N_1$	$N_2$	$N_3$	$N_4$	$N_5$

Les notes  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $N_3$ ,  $N_4$  et  $N_5$  correspondent aux résultats établis par les experts de cotation selon la méthodologie AHP.

<sup>18</sup> Une échelle linéaire avec un 0 non naturel est une échelle de type intervalle (ex. l'échelle de la température en degré Celsius : le 0 correspond au point de congélation de l'eau et non pas à l'absence de température).

### Les échelles ordinales

Tableau 48 : Exemple d'une échelle ordinale, ici l'échelle du critère T1 — Pérennité

PERENNITE DE L'INSTALLATION	≥ 10 ANS	≥ 5 ANS	≤ 3 AN	≤ 1 AN
NOTES	N <sub>1</sub>	N <sub>2</sub>	N <sub>3</sub>	N <sub>4</sub>

Les notes N<sub>1</sub>, N<sub>2</sub> et N<sub>3</sub> correspondent aux résultats établis par les experts de cotation selon la méthodologie AHP. Dans ce cas précis de construction, la méthode permet de traduire les éléments numériques de l'échelle, pour cet exemple l'ancienneté d'une voiture (en années), en notes comprises entre 0 et 1 (quantitative) et de s'affranchir des unités.

### Les échelles proportionnelles

Pour comparer des objets via cette catégorie d'échelle, il convient d'utiliser soit, des données qui correspondent à des grandeurs physiques (les émissions, les consommations) soit, une donnée quantitative abstraite (le coût par exemple).

Tableau 49 : Exemple d'une échelle de proportionnalité

RESULTATS DE LA COMPARAISON	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	≥ 100
NOTES	1	i <sub>1</sub>	i <sub>2</sub>	i <sub>3</sub>	i <sub>4</sub>	i <sub>5</sub>	i <sub>6</sub>	i <sub>7</sub>	i <sub>8</sub>	i <sub>9</sub>	i <sub>10</sub>

Le niveau 0 indique que les deux éléments de la comparaison sont égaux, il n'a donc pas de différence (le 0 apparait comme naturel). Les notes des éléments allant d'i<sub>1</sub> à i<sub>10</sub> correspondent aux valeurs numériques de l'échelle de jugement proposée par Saaty (Tableau 35) établies par les experts de cotation. Nous proposons un exemple d'utilisation pour cette échelle, qui est plus délicate à appréhender en Annexe 3.3 .

#### 3.4.2.5. Le sens de lecture des échelles

Nos échelles sont unidirectionnelles et le sens de lecture est donc important. Dans notre contexte d'étude, nous avons deux sens de lecture possibles : **plus est mieux** et **moins est mieux**.

Par exemple, il est plus intéressant pour le critère R<sub>1</sub> – respect de la hiérarchie de gestion des déchets d'être haut dans la hiérarchie de gestion des déchets ont dit alors que, « plus est mieux ».

Tableau 50 : Sens de lecture des échelles : cas 1 « plus est mieux »

NIVEAU DE LA HIERARCHIE	PREPARATION EN VUE DE LA REUTILISATION	RECYCLAGE	VALORISATION MATIERE	VALORISATION ENERGETIQUE	ÉLIMINATION
Note des éléments	N <sub>1</sub>	N <sub>2</sub>	N <sub>3</sub>	N <sub>4</sub>	N <sub>5</sub>
Avec N <sub>1</sub> > N <sub>2</sub> > N <sub>3</sub> > N <sub>4</sub> > N <sub>5</sub>					
Sens	<b>Plus est mieux.</b>				
Plus l'installation est identifiée à un niveau élevé de la hiérarchie de gestion des déchets, meilleure est sa note sur ce critère.					

Au contraire, il est préférable pour le critère Ec<sub>1</sub> – Coût d'utilisation de l'installation d'avoir un coût de gestion le moins élevé possible alors, « moins est mieux ».

Tableau 51 : Sens de lecture des échelles : cas 2 « moins est mieux »

INSTALLATIONS	INSTALLATION I1	INSTALLATION I2	INSTALLATION I3	INSTALLATION I4	INSTALLATION I5
Coût	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>
Avec C <sub>1</sub> < C <sub>2</sub> < C <sub>3</sub> < C <sub>4</sub> < C <sub>5</sub>					
Sens	<b>Moins est mieux.</b>				
Note des éléments	N <sub>1</sub>	N <sub>2</sub>	N <sub>3</sub>	N <sub>4</sub>	N <sub>5</sub>

INSTALLATIONS	INSTALLATION I1	INSTALLATION I2	INSTALLATION I3	INSTALLATION I4	INSTALLATION I5
Avec $N_1 > N_2 > N_3 > N_4 > N_5$					
Plus l'installation a un faible coût d'utilisation, plus sa note est élevée.					

Il est donc important de connaître le sens de lecture des critères au moment de l'interprétation des résultats.

#### 3.4.2.6. Conclusion sur les échelles de cotation

Nous venons de voir qu'il est possible de construire différentes échelles de cotation. Dans notre contexte, la méthodologie AHP a permis de transformer les éléments des différentes échelles utilisées en une note sans unité comprise entre 0 et 1. Elle a permis d'obtenir les notes des éléments constituant les échelles de cotation, c'est-à-dire de définir l'importance relative de chacun des éléments d'une échelle de critère.

#### 3.4.3. Conclusion sur l'ensemble des critères

Nous avons identifié deux grandes catégories de critères :

1. Les critères qui permettent d'**évaluer** les installations de traitement sur **une échelle de cotation**. Pour ces critères, les installations obtiennent une note qui est ensuite pondérée par le poids du critère. La somme des scores (résultats de la note pondérée) sur l'ensemble des critères de la dimension permet d'afficher une note globale pour chaque installation comparée. Il s'agit ensuite de comparer la note globale de chaque installation afin d'identifier celle qui est jugée préférable. En d'autres termes, les installations sont évaluées indépendamment des unes des autres sur ces critères.
2. Les critères qui permettent de **comparer** les installations **à partir d'un paramètre**, une variable. Il s'agit, pour ces critères, de comparer « directement » les installations via cette variable puis, à l'aide de la méthodologie de Saaty d'identifier celle qui est à prioriser sur la dimension. Dans ce cas, pour éviter une intervention systématique des experts à chaque étude, nous avons adapté la méthodologie de comparaison que propose Saaty, afin « d'automatiser » la comparaison. Les experts précisent leurs préférences sur une échelle de ratio intermédiaire (un exemple est donné en *annexe3.2*)

La majorité des critères se positionnent dans la première catégorie et seuls les critères présents dans le *Tableau 52* correspondent à la seconde catégorie.

*Tableau 52 : Les critères de la deuxième catégorie*

	CRITERES		
<b>R3</b>	Respect du principe de proximité	<b>EC1</b>	Coût d'utilisation de l'installation
<b>ENV2</b>	Impact sur le changement climatique	<b>TEC3.1</b>	Importance des moyens de transport
<b>ENV4</b>	Consommation en eau	<b>TEC3.2</b>	Diversité des moyens de transport
<b>ENV5</b>	Consommation en énergie		

### 3.5. LES EXPERTS

#### 3.5.1. La typologie des experts mobilisés

Nous avons vu dans l'introduction que trois catégories d'experts ont été mobilisées durant les travaux de thèse (*Figure 33*), ce qui constitue une des composantes clés de notre démarche. Il s'agit des experts de construction, de cotation et de confrontation. Leur typologie est représentée dans la *Figure 33* et les paragraphes ci-après expliquent chacune des expertises.



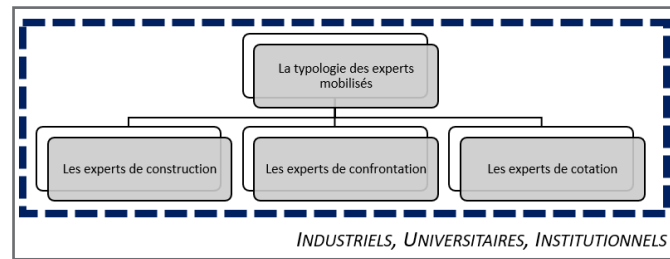


Figure 33 : La typologie des experts mobilisés

### 3.5.2. Les experts de construction

Les experts de construction sont intervenus dès le début des travaux de thèse (lors de brainstorming), ce sont les membres du comité de pilotage : les encadrants industriels et les directeurs de thèse. Ils sont également identifiés comme les référents des dimensions étudiées (Tableau 53). Ils ont d’une part, aidé à la définition des cinq dimensions et d’autre part, proposé des critères en complément des critères identifiés dans la littérature.

Tableau 53 : Les experts de construction référents par dimension

	DIMENSIONS				
	REGLEMENTAIRE	ÉCONOMIQUE	ENVIRONNEMENTALE	TERRITORIALE	TECHNIQUE
<b>LES EXPERTS DE CONSTRUCTION/LES REFERENTS DES DIMENSIONS</b>	Expert 1 (EDF <sub>1</sub> )	Expert 2 (Université de Nantes)	Expert 3 (UTT)	Expert 4 (EDF <sub>2</sub> )	Expert 1 (EDF <sub>1</sub> )
	Doctorant				

#### 3.5.2.1. Les experts de confrontation

Une fois que le modèle de critère a été finalisé, il a été soumis aux experts de confrontation. Ces derniers ont été sollicités pour examiner la robustesse des propositions et formuler des suggestions d’amélioration. Nous sommes également revenus vers eux pour présenter les résultats issus des études de cas (démarche recherche-action).

**Remarque :** une partie d’entre eux ont également contribué aux réflexions portant sur la construction des critères et/ou sur la cotation.

#### 3.5.2.2. Les experts de cotation

Nous avons sollicité ces experts pour recueillir leurs avis et leurs préférences afin d’établir les différentes pondérations nécessaires au fonctionnement de notre modèle. La constitution d’un groupe d’experts de cotation doit couvrir l’ensemble des dimensions étudiées. Ces derniers doivent être reconnus en tant qu’experts dans leur domaine (titre, métier, durée de l’expérience), mais également connaître particulièrement le secteur des déchets. Pour identifier les profils adéquats, les référents de chaque dimension ont proposé plusieurs personnes. Un descriptif détaillé du panel d’experts diversifié est disponible en Annexe 3.2. Les experts de cotation étaient interrogés individuellement pour l’obtention des poids des critères et des notes des échelles. À la section §3.5.2.4 de ce chapitre, nous détaillons la démarche mise en place pour recueillir leurs avis et leurs préférences.

#### 3.5.2.3. Discussion à propos des catégories d’experts

Les trois types d’experts sont intervenus successivement au fur et à mesure de l’avancée des travaux. Lors de la démarche recherche-action, des interactions entre expertises ont également eu lieu (Figure 34).

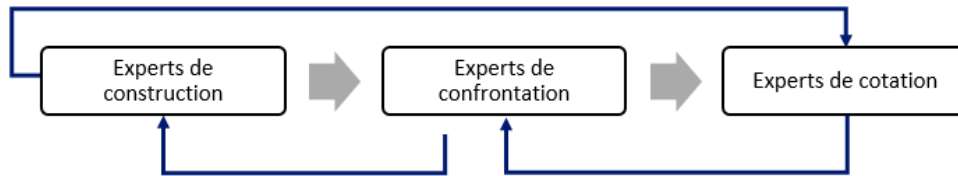


Figure 34 : L'interaction des différents experts dans la construction du modèle

Les experts de construction ont également été sollicités comme experts de cotation (Tableau 54). Néanmoins, leur influence sur les résultats est limitée puisqu'ils ne sont que cinq sur un total de plus de quarante-cinq experts de cotation. De plus, il est important de préciser que je (doctorant) ne suis intervenu que lors de la phase de construction. Enfin, notons que les experts de confrontation et de cotation ont des profils métiers diversifiés (Tableau 54).

Tableau 54 : Les différentes expertises

EXPERTS	CONSTRUCTION	CONFRONTATION	COTATION
Industriels	X	X	X
Académiques	X	X	X
Institutionnels		X	X
Doctorant (« je »)	X		

#### 3.5.2.4. La collecte des avis d'experts

Les experts jouent un rôle central dans la construction des critères. En effet, les experts de cotation établissent les notes des éléments constituant les échelles d'évaluation, mais proposent également une pondération entre les critères d'une même dimension. Pour obtenir ces informations, nous avons établi une démarche en deux étapes :

1. Une présentation des objectifs de la thèse et les critères à chaque expert,
2. Une collecte des avis d'experts à partir d'un questionnaire individuel.

Le questionnaire, un par dimension, est structuré de la façon suivante (Figure 35) :

QUESTIONNAIRE : DIMENSION N

PRESENTATION DE LA THESE

OBJECTIF DE CE DOCUMENT

TRAVAIL DEMANDE A L'EXPERT

QUESTIONNAIRE POUR LA CONSTRUCTION DES ECHELLES DE CRITERES DE LA DIMENSION N.

- 1. Critère  $N_1$  : Titre du critère  $N_1$
- Commentaires
- 2. Critère  $N_2$  : Titre du critère  $N_2$
- Commentaires
- 3. Critère  $N_n$  : Titre du critère  $N_n$
- Commentaires

4. Questionnaire pour l'obtention des poids des critères
 

- Commentaires

Figure 35 : Structure du questionnaire pour collecter les avis d'experts

Cette structure est identique pour chaque questionnaire et permet de recueillir les avis d'experts. Ces derniers disposent du même niveau d'information pour donner leurs préférences. Les questionnaires se veulent autoporteurs ainsi, pour chacun d'eux nous présentons les objectifs de la thèse et la raison pour laquelle nous les interrogeons.

Les experts interrogés proviennent de milieux très différents, en rapport avec la gestion des déchets et la ou les dimension(s) concernée(s), mais ces derniers ne sont pas obligatoirement familiers avec les méthodes

multicritères et notamment AHP, c'est pourquoi nous avons intégré une présentation de la méthodologie ainsi qu'un exemple d'utilisation de la méthode. Celui-ci permet à l'expert de s'approprier la méthode et de visualiser les informations qu'il doit fournir à savoir, ses préférences et ses justifications, pour que l'on puisse apprécier son avis et sa sensibilité.

Il est important de préciser que l'exemple présenté dans le questionnaire correspond à un critère d'une dimension différente que celle pour laquelle l'expert est questionné. Nous justifions ce choix pour éviter d'influencer l'expert lors de son jugement. Enfin, les annexes 1 et 2 du questionnaire rappellent l'échelle verbale proposée par Saaty et résumant l'ensemble des critères de la dimension étudiée sous la forme d'une structure hiérarchique. Ces deux annexes permettent à l'expert d'avoir une vision globale de la méthodologie AHP et des critères de la dimension. Les questionnaires sont disponibles en annexe suivant l'ordre établi par le *Tableau 55* ci-dessous :

*Tableau 55 : Questionnaires et annexes*

DIMENSIONS	ANNEXES
Réglementaire	<i>Annexe 3.5</i>
Économique	<i>Annexe 3.6</i>
Territoriale	<i>Annexe 3.7</i>
Technique	<i>Annexe 3.8</i>
Environnementale	<i>Annexe 3.9</i>

L'un des points innovants de notre démarche réside dans le panel diversifié et le nombre d'experts que nous avons interrogés. Pour assurer la solidité de notre outil, nous avons mobilisé des expertises industrielle, institutionnelle et universitaire (cf. §3.5.2.3).

### 3.5.3. Les experts interrogés

Les experts interrogés proviennent de milieux très différents, en rapport avec la gestion des déchets et la ou les dimension(s) concernée(s). Le *Tableau 56* ci-dessous récapitule le nombre d'experts sollicités, le nombre de questionnaires envoyés, le nombre de questionnaires exploitables et non exploitables, ainsi le nombre d'experts par typologie. L'*Annexe 3.2* regroupe sous la forme de tableau, les détails des experts sollicités.

*Tableau 56 : Le nombre d'experts*

EXPERTS SOLLICITES	NOMBRE DE QUESTIONNAIRES ENVOYES	NOMBRE DE QUESTIONNAIRES REÇUS EXPLOITABLE	NOMBRE DE QUESTIONNAIRES NON EXPLOITABLE	NOMBRE DE « NON-REponses »
84	49	38	7 <sup>19</sup>	4
TYPES D'EXPERT				
CONSTRUCTION	CONFRONTATION		COTATION	
5	52		38	
<i>Doctorant</i>				

Le nombre élevé d'experts de confrontation s'explique par le fait que les experts de cotation ont obligatoirement été des experts de confrontation à un moment donné. En effet, ils ont, soit confronté le modèle lors de réunions et ont accepté de pondérer les critères, soit lors des interviews puisque les experts ont été

<sup>19</sup> Parmi les 7 questionnaires, 2 questionnaires ne sont pas exploitables pour des questions de points de vue. 5 Questionnaires ne sont pas exploitables car les experts n'ont pas utilisé le document de réponse (notamment les matrices de comparaison). Dans les deux cas, les remarques et préférences sont exploitables. Ces experts ont été considérés comme des experts de confrontation.

invités à justifier chacun de leurs choix. De plus, les experts de construction ont également été des experts de confrontation sur les dimensions pour lesquelles ils n'étaient pas les référents.

La collecte des avis, parfois divergents, nous a conduits à des questionnements sur les méthodes d'agrégation.

### 3.6. L'AGREGATION

Au cours de la démarche, nous avons été confrontés à plusieurs reprises à des étapes d'agrégation. Tout d'abord, il existe plusieurs solutions d'agrégation pour obtenir les notes des éléments constituant les échelles d'évaluation et la pondération des différents critères. Cette problématique est liée au fait que nous avons collecté plusieurs avis d'experts, parfois divergents. Un des avantages de la méthode AHP, est qu'elle permet justement de prendre en compte plusieurs avis d'experts<sup>[176]</sup>. Les sections suivantes présentent les différentes possibilités d'agrégation des avis, le choix que nous avons effectué et la méthodologie d'agrégation pour obtenir les notes finales de chacune des dimensions.

#### 3.6.1. L'agrégation des avis d'experts

Bien que la méthode AHP ait été appliquée dans un premier temps pour l'aide à la décision individuelle, des travaux montrent que la méthodologie a été étendue pour aider un groupe de décideurs<sup>[132], [176]</sup>. Le *Tableau 57* ci-dessous regroupe quelques travaux de recherches portant sur l'agrégation des avis d'experts lors d'un problème de décision avec la méthode AHP.

*Tableau 57 : Méthode d'agrégation des avis d'experts lors d'un problème de décision de groupe avec AHP*

ACRONYMES	NOM ET SOURCE
AIJ	Aggregation of individual judgments (agrégation des jugements individuels) <sup>[177]</sup>
AIP	Aggregation of individual priorities (agrégation des poids relatifs individuels) <sup>[177]</sup>
CCM	Consensus Convergence Model <sup>[178]</sup>
GCCM	Geometric Cardinal Consensus Model <sup>[178]</sup>
SAAP	Simulated annealing aggregation procedure <sup>[178]</sup>
PPDACRM	A Peer-to-Peer Dynamic Adaptive Consensus Reaching Model <sup>[179]</sup>
AFCB	Algorithm for Consensus Building in AHP-group decision making <sup>[180]</sup>

Ainsi, il existe plusieurs solutions pour synthétiser les avis d'experts avec la méthodologie AHP. Néanmoins, les deux principales<sup>[177], [178], [181], [182]</sup> sont les suivantes :

1. l'agrégation des jugements individuels (amont de la matrice de comparaison),
2. l'agrégation des poids relatifs individuels (aval de la matrice de comparaison).

Dans les parties suivantes, nous proposons de décrire plus précisément le fonctionnement des deux formes d'agrégation citées précédemment et de présenter succinctement la méthode Delphi.

##### 3.6.1.1. L'agrégation des jugements individuels (AIJ)

La première méthode consiste à combiner les préférences des experts interrogés selon la démarche suivante : les préférences individuelles des experts sont exprimées au travers de matrice de préférence, quatre experts dans le cas présenté dans la *Figure 36* ci-après. L'agrégation intervient en amont de la démarche AHP, où l'ensemble des préférences des experts ont été assemblées afin de ne former qu'une seule matrice de comparaison. Cette agrégation peut être effectuée en utilisant la méthode de la moyenne arithmétique ou géométrique (*Figure 36*). Ensuite, pour obtenir la pondération des éléments, il s'agit d'appliquer normalement les étapes suivantes de la démarche AHP.

				<b>Moyenne arithmétique</b>			
Expert 1	Élément 1	Élément 2	Élément 3	Expert 1	Élément 1	Élément 2	Élément 3
Élément 1	1	3	5	Élément 1	1	$\frac{3 + 5 + 3 + a}{\text{Nombre d'experts}}$	$\frac{5 + 7 + 5 + b}{\text{Nombre d'experts}}$
Élément 2	1/3	1	7	Élément 2	1/3	1	$\frac{7 + 9 + 7 + c}{\text{Nombre d'experts}}$
Élément 3	1/5	1/7	1	Élément 3	1/5	1/7	1
				<b>Moyenne géométrique</b>			
Expert 1	Élément 1	Élément 2	Élément 3	Expert 1	Élément 1	Élément 2	Élément 3
Élément 1	1	3	5	Élément 1	1	$\sqrt[\text{nb d'expert}]{3 * 5 * 3 * a}$	$\sqrt[\text{nb d'expert}]{5 * 7 * 5 * b}$
Élément 2	1/3	1	7	Élément 2	1/3	1	$\sqrt[\text{nb d'expert}]{7 * 9 * 7 * c}$
Élément 3	1/5	1/7	1	Élément 3	1/5	1/7	1

Figure 36 : L'agrégation des jugements individuels

### 3.6.1.2. L'agrégation des poids relatifs individuels (AIP)

La seconde méthode s'établit à partir des résultats établis par les préférences des experts. L'agrégation s'effectue alors sur les poids (ou notes) établis par les différentes matrices de comparaison (Figure 37). Dans ce cas, l'agrégation intervient en aval de la démarche AHP.

Expert 1	Élément 1	Élément 2	Élément 3	<b>Poids</b>	<b>Moyenne arithmétique</b>		
Élément 1	1	3	5	0,59		<b>Poids</b>	
Élément 2	1/3	1	7	0,33	Élément 1	$\frac{0,59 + 0,66 + 0,59 + A}{\text{Nombre d'experts}}$	
Élément 3	1/5	1/7	1	0,08	Élément 2	$\frac{0,33 + 0,28 + 0,33 + B}{\text{Nombre d'experts}}$	
				<b>Poids</b>	Élément 3	$\frac{0,08 + 0,06 + 0,08 + C}{\text{Nombre d'experts}}$	
Expert 2	Élément 1	Élément 2	Élément 3	<b>Poids</b>	<b>Moyenne géométrique</b>		
Élément 1	1	5	7	0,66		<b>Poids</b>	
Élément 2	1/3	1	9	0,28	Élément 1	$\sqrt[\text{nb d'expert}]{0,59 * 0,66 * 0,59 * A}$	
Élément 3	1/5	1/7	1	0,06	Élément 2	$\sqrt[\text{nb d'expert}]{0,33 * 0,28 * 0,33 * B}$	
				<b>Poids</b>	Élément 3	$\sqrt[\text{nb d'expert}]{0,09 * 0,06 * 0,09 * C}$	
Expert 3	Élément 1	Élément 2	Élément 3	<b>Poids</b>			
Élément 1	1	3	5	0,59			
Élément 2	1/3	1	7	0,33			
Élément 3	1/5	1/7	1	0,08			
				<b>Poids</b>			
Expert n	Élément 1	Élément 2	Élément 3	<b>Poids</b>			
Élément 1	1	a	b	A			
Élément 2	1/3	1	c	B			
Élément 3	1/5	1/7	1	C			

Figure 37 : L'agrégation des poids relatifs individuels

Une autre solution consiste à mettre en place la méthode Delphi. Cette dernière nous a été recommandée par Sebastien DAMART (Annexe 3.1) et nous détaillons cette méthodologie d'agrégation au point suivant.

### 3.6.1.3. La méthode Delphi

Cette dernière vise à obtenir un avis aussi consensuel que possible des experts grâce à un processus structuré de communication organisant la production, l'agrégation et la modification des opinions d'un groupe indépendant d'experts. Il n'y a alors plus qu'un avis final consensuel.

**Exemple :** Si 95 % des experts choisissent A et que les 5 % des autres préfèrent B, la méthode Delphi propose à l'organisateur des interviews de demander aux experts non majoritaires (5 %) de vérifier que ces derniers maintiennent leurs jugements après la publication des résultats.

Attention, si les avis d'experts sont très dispersés Delphi n'a plus d'intérêt, il est préférable d'utiliser cette méthode si les dispersions sont distribuées selon une courbe de Gauss. Si la dispersion est trop grande, il est difficile de justifier l'emploi de cette méthodologie.

#### 3.6.1.4. Discussion à propos des différentes solutions d'agrégations

Nous avons choisi de ne pas retenir la méthode Delphi, où les experts sont en quelque sorte contraints à se rallier au point de vue des autres experts afin, de converger vers une préférence commune. De plus, comme pour la majorité des méthodes citées dans le *Tableau 57*, pour obtenir un consensus entre les différents experts interrogés, il est nécessaire de déployer plusieurs itérations. Ces étapes requièrent beaucoup de temps et peuvent complexifier le problème de décision<sup>[180]</sup>. De plus, nous voulions que l'ensemble des avis récoltés, du panel diversifié d'experts interrogés, soit représentés afin d'obtenir un expert « moyen ».

Dans le cadre de l'agrégation des préférences (cf. §3.6.1.1) ou des poids individuels (cf. §3.6.1.2), la littérature montre qu'il est possible d'utiliser, dans les deux cas, la moyenne arithmétique ou la moyenne géométrique. Ces deux moyennes indiquent la tendance centrale des résultats. Cependant, la moyenne arithmétique présente l'inconvénient d'être très sensible aux valeurs extrêmes alors que la moyenne géométrique permet de réduire l'influence des valeurs extrêmes d'une série.

Des travaux menés par *Ernerst Forman et Kirti Peniwati* vont plus loin dans les recommandations<sup>[177]</sup>. En effet, selon les auteurs, il appartient aux experts interrogés de choisir une méthode d'agrégation (AIJ ou AIP). Si les experts donnent leur accord pour créer un jugement collectif et il est alors préférable, voire obligatoire, d'utiliser une agrégation des préférences individuelles (cf. §3.6.1.1) avec une moyenne géométrique<sup>20</sup>. Si les experts ne veulent pas être assimilés à un groupe, alors il convient d'utiliser une agrégation des poids individuels (cf. §3.6.1.2) avec soit une moyenne arithmétique soit, une moyenne géométrique<sup>[177], [181], [182]</sup>.

Dans le cadre de notre travail, nous avons étudié plusieurs possibilités (8 au total) d'agrégation (*Tableau 58*) afin de mieux comprendre l'influence de chacune des méthodes sur les résultats.

*Tableau 58 : Les différentes possibilités d'agrégation testées*

AGREGATION DES PREFERENCES INDIVIDUELLES	AGREGATION DES POIDS RELATIFS INDIVIDUELS
Moyenne arithmétique	Moyenne arithmétique
Moyenne géométrique	Moyenne géométrique <sup>21</sup>
Médiane	Médiane
Moyenne pondérée	Moyenne pondérée

Après avoir mené plusieurs analyses de sensibilité avec les différentes possibilités (*Tableau 58*), nous avons choisi d'utiliser l'**agrégation géométrique des préférences** (*Figure 36*). En effet, quelle que soit la méthode d'agrégation et le type de moyenne utilisé, les résultats sont sensiblement les mêmes (proche de la médiane) et l'ordre des résultats n'est pas inversé. Ce choix est également conforme aux travaux issus de la littérature, discutés dans les paragraphes ci-dessus. Néanmoins, lors de la réalisation d'études de cas, nous proposons d'effectuer des analyses de sensibilité afin de vérifier que la méthode d'agrégation choisie et que le type de moyenne utilisée ne modifient pas les conclusions d'une comparaison et de l'étude.

<sup>20</sup> Il existe, aujourd'hui, un débat au sein de la communauté scientifique à propos de l'agrégation des jugements individuels avec une moyenne géométrique. En effet, *Ramanathan et Ganesh* recommandent de n'utiliser que l'agrégation des poids relatifs individuels, puisque l'agrégation des jugements individuels ne répond pas au principe de Pareto<sup>[182]</sup>. Alors que, les travaux d'*Aczel et de Roberts*, montre que la moyenne géométrique permet de respecter le principe de Pareto (condition d'unanimité) et d'homogénéité puisqu'un nouvel avis d'experts est créé et que les experts individuels ont « perdu » leurs identités<sup>[177]</sup>.

<sup>21</sup> Il est important de noter que l'utilisation de la moyenne géométrique pour une agrégation des poids ou des notes implique une étape supplémentaire de normalisation des résultats afin que la somme de ces éléments soit égale à 1 et que les éléments soient toujours exprimés relativement les uns par rapport aux autres.

### 3.7. CALCUL DES NOTES FINALES POUR CHACUNE DES DIMENSIONS

En résumé, les dimensions environnementale, réglementaire, économique, territoriale et technique sont composées d'un ensemble de critères sélectionnés ou construits dans le cadre de cette étude (3 à 6 par dimension). Chaque critère est composé d'éléments répartis sur une échelle d'évaluation (cf. §3.4.2). Ainsi, lors de l'utilisation de notre modèle, chaque installation obtient une note qui est pondérée par le poids du critère pour obtenir un score (1).

$$(1) \text{ Score} = \text{Note} * \text{Poids du critère}$$

Pour chaque installation, les scores obtenus sur chacun des critères sont additionnés par dimension.

**Attention :** Les dimensions doivent être comparées indépendamment des unes des autres, car elles ne disposent pas nécessairement de la même échelle globale. Pour afficher les cinq dimensions sur une seule et même représentation graphique (graphique radar par exemple), il faut d'abord normaliser les résultats des cinq dimensions.

La section §3.8 développe les différents moyens que nous avons mis en place pour analyser et discuter des résultats afin d'apporter une aide à l'arbitrage.

### 3.8. ANALYSE DES RESULTATS

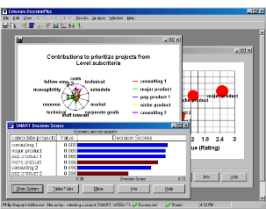
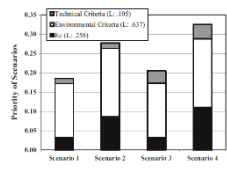
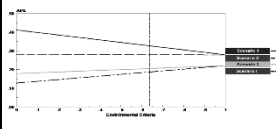
Généralement, les performances des installations de gestion de déchets varient selon les dimensions, ce qui peut rendre l'analyse des résultats difficile pour le gestionnaire de déchets.

Pour pouvoir interpréter et discuter des résultats avec les services de gestion de déchets de l'entreprise, nous avons proposé et discuté de différentes représentations graphiques facilitant la lecture des résultats.

#### 3.8.1. Les représentations graphiques des résultats

Au cours des travaux, nous avons cherché plusieurs représentations graphiques pour visualiser rapidement, clairement et facilement les résultats. Les représentations des résultats dans les travaux de la littérature sont des présentations simples, issues des logiciels informatiques dédiés (*Tableau 59*). On retrouve principalement des histogrammes, des graphiques de types radars ou des courbes.

Tableau 59 : Représentation des résultats selon les logiciels (AHP)

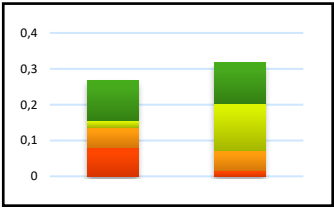
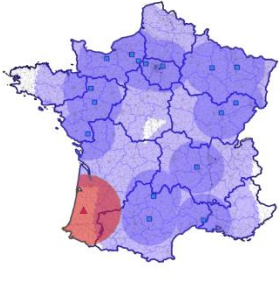

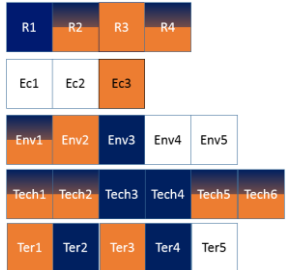
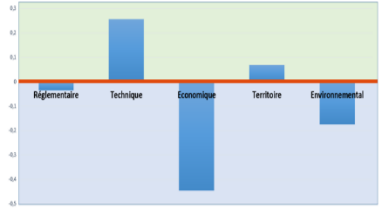
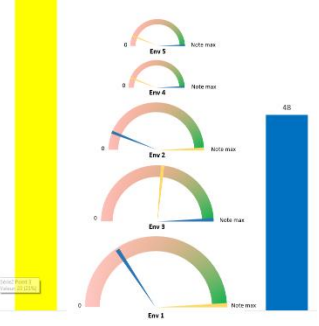
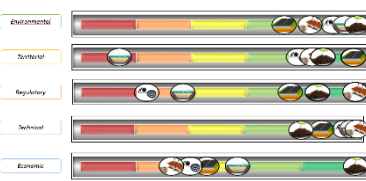
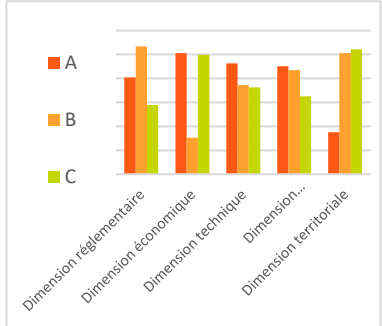
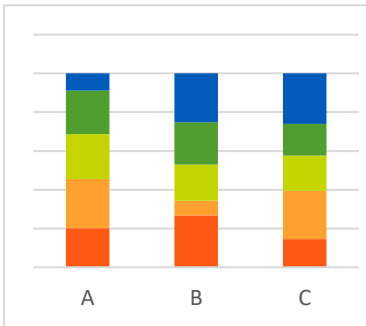
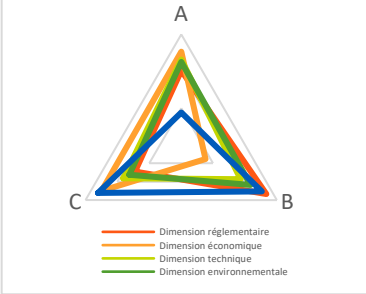
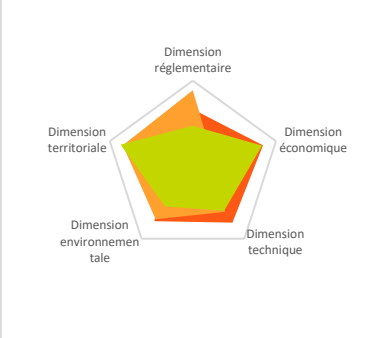
CRITERIUM DECISION PLUS 3,0	EXPERT CHOICE	ALIAH THINK
		
<a href="http://www.lionhrtpub.com/orms/orms-2-00/cdpmain.html">http://www.lionhrtpub.com/orms/orms-2-00/cdpmain.html</a>	<a href="http://www.expertchoice.com/download/Default.htm">http://www.expertchoice.com/download/Default.htm</a>	Pas d'image disponible <a href="http://www.decisioncoaches.com">http://www.decisioncoaches.com</a>

Nous avons choisi de construire notre modèle via Excel, pour des raisons de transparence, de fonctionnement et de diffusion interne à l'entreprise, d'adaptabilité, de mise à jour, ou encore des raisons liées à la construction de certains de nos critères (en lien avec des bases de données).

Cet outil informatique permet de présenter graphiquement des résultats selon plusieurs possibilités. À ce titre, nous avons testé plusieurs représentations que nous avons exposées au groupe de réflexion portant sur l'économie circulaire de l'entreprise et à plusieurs experts de confrontation lors de diverses présentations. Le *Tableau 60*, ci-dessous, regroupe l'ensemble de nos propositions :



Tableau 60 : Les différentes représentations graphiques des résultats

<p><b>1</b>      <b>HISTOGRAMME</b></p> 	<p><b>2</b>      <b>GIS</b></p> 	<p><b>3</b>      <b>CUBE + *</b></p> 
<p><b>4</b>      <b>BLUECUBE*</b></p> 	<p><b>5</b>      <b>A-B</b></p> 	<p><b>6</b>      <b>COMPTEUR**</b></p> 
<p><b>7</b>      <b>REGLETTE***</b></p> 	<p><b>8</b>      <b>HISTOGRAMME</b></p> 	<p><b>9</b>      <b>HISTOGRAMME COMPILE</b></p> 
<p><b>10</b>      <b>RADAR INSTALLATION</b></p> 	<p><b>11</b>      <b>RADAR DIMENSION</b></p> 	<p><b>**</b>      <b>LEGENDE</b></p> <p>* Les représentation [3] et [4] ont été le fruit de plusieurs heures de travail.</p> <p>** La représentation [6] est issue d'un brainstorming</p> <p>*** La représentation [7] est une adaptation des « réglettes » issues de la thèse de <i>Baptiste Anger</i>.</p>

Chacune de ces représentations graphiques possède des avantages et des inconvénients pour la lecture et l'interprétation des résultats (Tableau 61).

Tableau 61 : Les caractéristiques des représentations graphiques testées

FIGURE	CARACTERISTIQUES
[1]	La représentation [1] montre des résultats « bruts » détaillés (par critère) sur une dimension.
[2]	La figure [2], propose de visualiser la zone de chalandise des installations sur la dimension réglementaire. Cette représentation graphique est difficilement généralisable à l'ensemble des dimensions puisqu'il est nécessaire d'extraire le critère distance des autres critères de la dimension
[3]	La figure [3] permet de visualiser rapidement l'importance du critère par rapport à la grandeur du cube. Les couleurs représentent l'installation qui a obtenu la meilleure note sur chacun des critères
[4]	La figure [4] utilise un fond de couleur pour désigner la meilleure installation par critère. Les cubes blancs mettent en évidence les critères qui n'ont pas été nécessaires pour effectuer la comparaison. Par exemple sur cette même figure, les critères Ec1 et Ec2, de la dimension économique, sont blancs et le critère Ec3 orange. Si les deux critères Ec1 et EC2 étaient bleus, les résultats globaux sur la dimension n'auraient pas été changés.
[5]	La figure [5], est une représentation de type soustraction. Les résultats finaux d'une installation sont soustraits par rapport à la deuxième par dimension (attention à la normalisation des dimensions).
[6]	La figure [6] permet d'examiner plusieurs informations à savoir, les notes finales relatives aux installations comparées, le résultat des installations sur chacun des critères (en relatif) ainsi que l'importance du critère de la dimension à partir du rayon du compteur.
[7]	La figure [7], nous montre les résultats sur les cinq dimensions pour l'ensemble des installations. Les résultats sont exprimés en relatif par rapport à la meilleure des installations comparées. Cette représentation permet de mesurer un « éloignement » d'une installation par rapport à la meilleure installation de la dimension. Néanmoins, cette représentation ne doit pas occulter une analyse approfondie des résultats. En effet, cette représentation peut induire en erreur un décideur opérationnel puisqu'une installation peut être meilleure que toutes les autres, mais sans pour autant être efficace sur la dimension.
[8]	La figure [8] est un histogramme classique de comparaison où seuls les résultats globaux par dimension sont présentés (attention à la normalisation des dimensions).
[9]	La figure [9], propose de visualiser l'importance des critères d'une dimension dans la note finale d'une installation
[10]	Les figures [10] et [11] sont des représentations de type radar. À plusieurs reprises, les experts de confrontations nous ont précisé que la lecture des résultats est difficile. De plus, suivant le positionnement des installations ou des dimensions sur les axes, la superposition des couleurs et/ou les formes dessinées par les résultats peuvent entraîner des erreurs d'interprétation.
[11]	

Les représentations graphiques (Tableau 60) détaillées ci-dessus ne doivent pas occulter une analyse approfondie des résultats. Ces dernières permettent de mieux appréhender la complexité du système étudié et d'en tirer des enseignements sur :

- les critères fixes qui ne permettent pas de départager les installations,
- les critères non déterminants,
- les critères à forte variabilité influençant peu ou beaucoup le résultat final.

**Remarque :** les représentations [2], [3], [4], [6] et [7] sont des représentations inventées ou adaptées d'autres travaux. Pour arriver aux résultats finaux, nous avons mené des réflexions sur plusieurs heures (brainstorming).

### 3.8.2. Analyses de sensibilité

L'ensemble des conclusions et des résultats doivent également faire l'objet d'analyses de sensibilité. En effet, lors de la réalisation d'un cas d'études, certains critères nécessitent de poser au préalable des hypothèses dont les conséquences doivent également être étudiées. De plus, plusieurs données sont potentiellement variables. Le Tableau 62 ci-dessous regroupe l'ensemble des analyses à effectuer lors d'un cas d'étude poussé :

Tableau 62 : Les analyses de sensibilité à mener

ANALYSES LIEES AUX DONNEES	ANALYSES LIEES A L'AGREGATION	ANALYSES LIEES AUX HYPOTHESES
Critère Ec <sub>1</sub>	Agrégation des préférences	Critère Ec <sub>2</sub>
Critère Env <sub>2</sub>	Agrégation des poids individuels	Critère Ter <sub>1</sub>
Critère Env <sub>4</sub>	Moyenne arithmétique	
Critère Env <sub>5</sub>	Moyenne géométrique	
Critère Ter <sub>4</sub>	Pondération des experts (simulation de plusieurs experts pour 1 avis).	

Il est évident que si des données proviennent de sources fiables (devis par exemple), il n'est pas nécessaire d'effectuer des analyses de sensibilité sur le critère  $EC_1$  — *coût d'utilisation de la filière*.

### 3.9. DISCUSSION

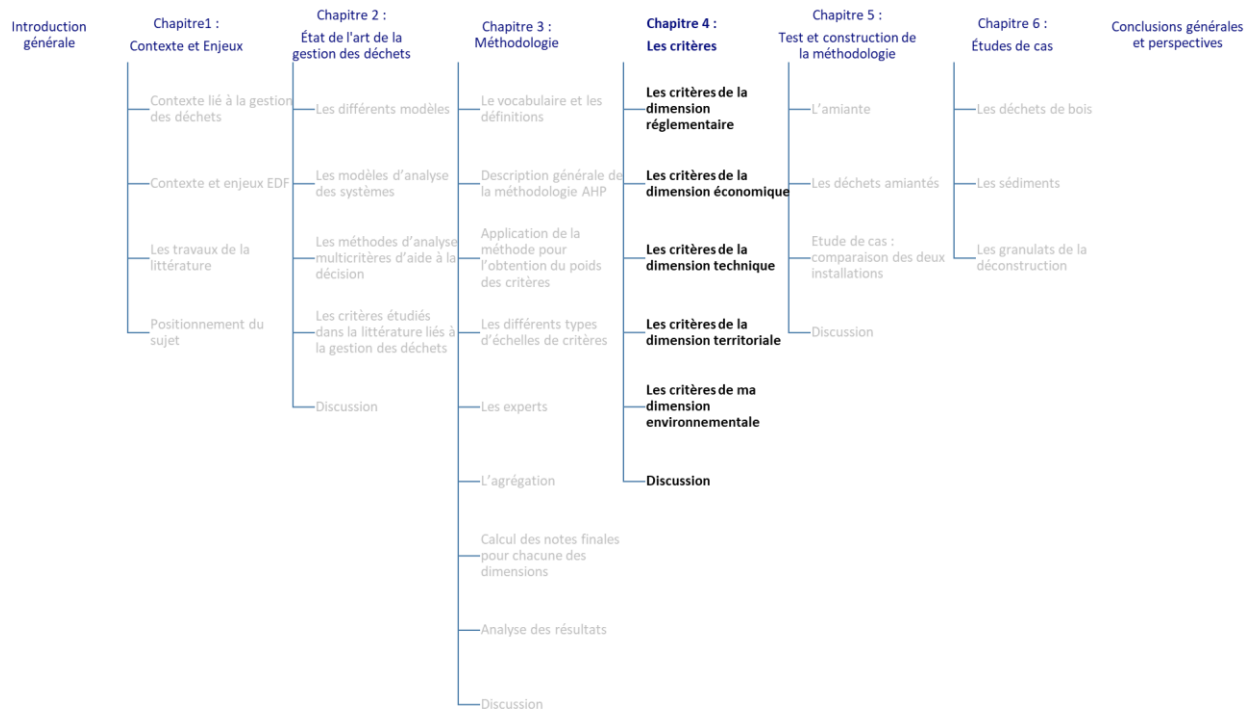
La méthodologie mise en place se distingue sur plusieurs points par rapport aux travaux de la littérature. Plusieurs parties innovantes ont été développées pour répondre à notre besoin. Elles concernent principalement la méthodologie déployée et la partie « experts ».

La méthodologie recherche-action a permis de bâtir notre modèle. En effet, l'ensemble de nos critères a été construit sur la base de cas d'études portant sur les déchets amiantés. Nous verrons que les cas d'études portant sur les déchets de bois, les sédiments, et les gravats issus de la déconstruction ont permis de valider la solidité et le caractère polyvalent de notre outil. Cet aspect multi-déchets est innovant par rapport aux travaux de la littérature. Cette caractéristique est permise grâce à la construction des échelles de nos critères, mais aussi via la base de données d'avis d'experts. En effet, l'expertise sollicitée est dissociée des cas d'application. En outre, les interviews n'ont pas été menées pour un cas d'étude particulier (comme dans la littérature), mais plutôt pour formaliser des connaissances métiers.

Ensuite, cette base de données d'avis d'experts a été construite à partir d'interviews dans une démarche transparente et clairement expliquée dans différentes parties de ce document. Les experts de cotation n'ont pas participé à la construction des critères (sauf un expert par dimension). En revanche, les experts de cotation ont tenu un rôle d'experts de confrontation lors de la phase interviews, puisqu'il leur a été demandé de justifier leurs préférences. Ainsi, ces derniers ont eu l'occasion de critiquer la construction des critères et le modèle de manière générale. Néanmoins, il paraît évident aujourd'hui que ce biais ne pouvait pas être contourné, puisqu'il est impossible de présumer qu'un expert peut uniquement être considéré comme un expert de cotation sans qu'il ait à réfléchir aux différentes constructions et donc à se positionner comme un expert de confrontation.

Nous avons également décidé, de manière arbitraire, que l'avis de chaque expert possède la même valeur. En outre, même si les avis peuvent être parfois différents, nous avons pris en compte l'ensemble des avis, sans pondération, afin de fabriquer un expert dit « **moyen** ». Celui-ci a été construit à partir de la moyenne géométrique et une agrégation des préférences. De plus, les analyses de sensibilité des pondérations données par les avis d'experts montrent que les écarts n'ont pas d'influence significative sur les résultats (poids des critères et notes des éléments des échelles d'évaluation).

# CHAPITRE 4 : LES CRITERES



## RESUME

Dans ce chapitre, nous précisons les 23 critères retenus pour évaluer les installations de gestion de déchets selon les dimensions :

- réglementaire,
- économique,
- technique,
- territoriale,
- environnementale.

Pour chacun d'eux, nous décrivons brièvement le critère, l'objectif du critère (que mesure t'il ?), l'échelle d'évaluation (les différentes possibilités de réponse à la question) ainsi que son importance relative.

A la fin de ce chapitre, nous présentons également les critères non retenus que nous avons bâti durant les travaux.

## SOMMAIRE DU CHAPITRE 4

<b>4.1. LES CRITERES DE LA DIMENSION REGLEMENTAIRE</b>	<b>104</b>
4.1.1.R1 – Respect de la hiérarchie de gestion des déchets .....	104
4.1.2.R2 – Niveau de responsabilité du producteur de déchets.....	105
4.1.3.R3 – Respect du principe de proximité.....	106
4.1.4.R4 – Positionnement vis-à-vis des objectifs de valorisation.....	107
4.1.5.L’importance des critères de la dimension réglementaire.....	108
<b>4.2. LES CRITERES DE LA DIMENSION ECONOMIQUE</b>	<b>108</b>
4.2.1.Ec1 – Coût d’utilisation de l’installation .....	109
4.2.2.Ec2 – Intensité concurrentielle.....	109
4.2.3.Ec3 – Intensité de la demande .....	110
4.2.4.L’importance des critères de la dimension économique .....	111
<b>4.3. LES CRITERES DE LA DIMENSION TECHNIQUE</b>	<b>111</b>
4.3.1.T1 – Pérennité de l’installation .....	111
4.3.2.T2 – Adéquation du déchet en entrée d’installation.....	112
4.3.3.T3 – Adéquation du produit dans une filière .....	112
4.3.4.T4 – Multiplicité des produits.....	113
4.3.5.T5 – Capacité d’absorption annuelle de l’installation.....	114
4.3.6.T6 – Flexibilité d’absorption de l’installation.....	114
4.3.7.L’importance des critères de la dimension technique.....	115
<b>4.4. LES CRITERES DE LA DIMENSION TERRITORIALE</b>	<b>115</b>
4.4.1.Ter1 – Favoriser l’économie locale .....	116
4.4.2.Ter2 – Utilisation locale de la ressource .....	117
4.4.3.Ter3 – Capacité à transporter le déchet sur le territoire .....	117
4.4.3.1. Ter3.1 - Importance du réseau de transport du territoire.....	118
4.4.3.2. Ter3.2 - Importance de la diversité des moyens de transport du territoire .....	118
4.4.4.Ter4 – Emploi .....	119
4.4.5.Ter5 – Incitations locales (politique, économique, réglementaire).....	120
4.4.5.1. Ter5.1 - Dynamique d’Économie Industrielle et Territoriale (EIT) sur le territoire.....	120
4.4.5.2. Ter5.2 - Sensibilité territoriale pour la valorisation des déchets .....	120
4.4.5.3. Ter5.3 - Ambition territoriale pour la gestion des déchets.....	121
4.4.6. L’importance des critères de la dimension territoriale.....	122
<b>4.5. LES CRITERES DE LA DIMENSION ENVIRONNEMENTALE</b>	<b>122</b>
4.5.1.Env1 – Impacts environnementaux réglementés.....	122
4.5.2.Env2 – Impacts sur le changement climatique.....	123
4.5.3.Env3 – Economie de matières premières vierges .....	124
4.5.4.Env4 – Consommation en eau .....	125
4.5.5.Env5 – Consommation en énergie .....	125
4.5.6.L’importance des critères de la dimension environnementale .....	126
<b>4.6. DISCUSSION</b>	<b>126</b>

## INTRODUCTION

L'outil d'aide à la décision que nous proposons est principalement composé des éléments suivants :

- les critères et leur échelle d'évaluation,
- les données,
- les avis d'experts.

Pour faciliter l'assemblage de ces différents éléments, nous avons fait le choix de construire l'outil via le logiciel Excel. Ce choix de construction est motivé pour plusieurs raisons, il permet :

- de tenir compte des adaptations de la méthodologie AHP que nous avons faites,
- de traiter plusieurs types de déchets sans changer l'interface de construction, à la condition de disposer du jeu de données adéquates,
- d'avoir la transparence sur les calculs effectués pour à la fois, vérifier et analyser les différentes étapes de calculs en fonction des hypothèses choisies et d'avoir la possibilité d'exploiter graphiquement les résultats à notre convenance. Ce logiciel est le « liant » de nos différents éléments (*Figure 38*).

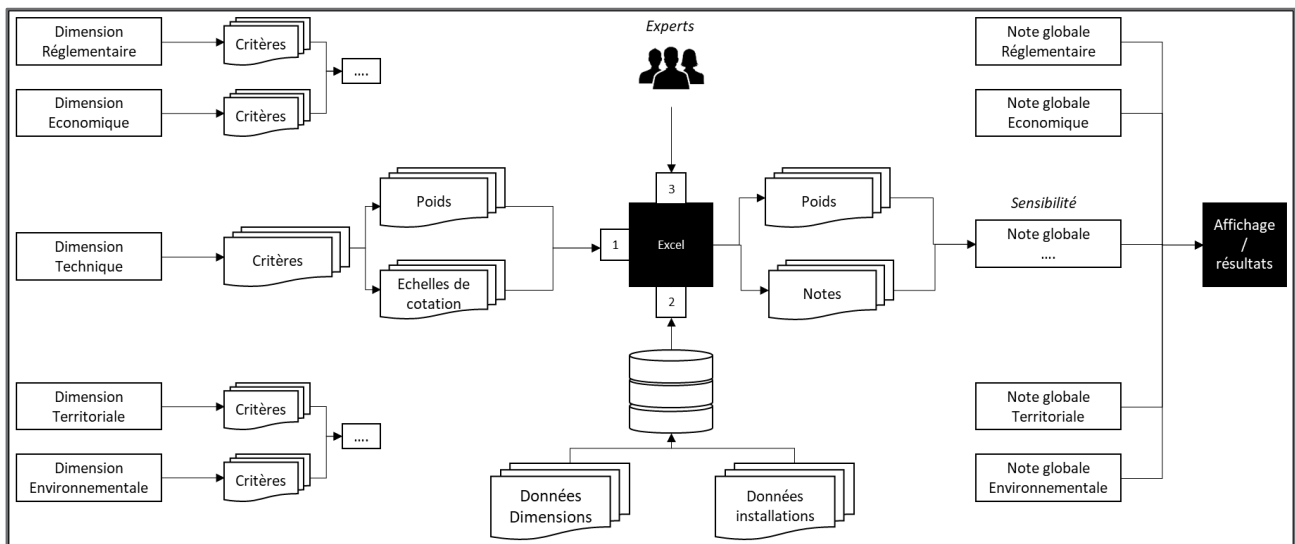


Figure 38 : Modèle d'outil

## LES CRITERES

Notre modèle d'analyse est composé de vingt-trois critères répartis en cinq catégories (*Tableau 63*). Celles-ci correspondent aux cinq dimensions retenues pour l'évaluation de la gestion des déchets.

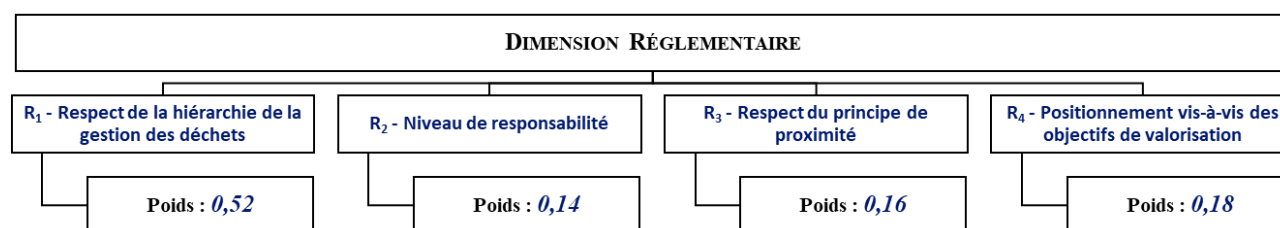
*Tableau 63 : Liste des critères retenus par dimension*

REGLEMENTAIRE	ÉCONOMIQUE	TECHNIQUE	TERRITORIAL	ENVIRONNEMENTAL
R <sub>1</sub> Respect de la hiérarchie de la gestion des déchets	Ec <sub>1</sub> Coût d'utilisation de l'installation	T <sub>1</sub> Pérennité de l'installation	Ter <sub>1</sub> Favoriser l'économie locale	Env <sub>1</sub> Absence d'impacts environnementaux
R <sub>2</sub> Niveau de responsabilité	Ec <sub>2</sub> Intensité concurrentielle	T <sub>2</sub> Adéquation du déchet en entrée d'installation	Ter <sub>2</sub> Utilisation locale de la ressource	Env <sub>2</sub> Changement climatique
R <sub>3</sub> Positionnement de la gestion vis-à-vis des objectifs de valorisation	Ec <sub>3</sub> Intensité de la demande	T <sub>3</sub> Adéquation du produit dans une filière	Ter <sub>3</sub> Capacité à transporter le déchet sur le territoire	Env <sub>3</sub> Extraction de matières premières
R <sub>4</sub> Respect du principe de proximité		T <sub>4</sub> Multiplicité des produits	Ter <sub>4</sub> Emploi	Env <sub>4</sub> Consommation en eau
		T <sub>5</sub> Capacité d'absorption annuelle de l'installation	Ter <sub>5</sub> Incitations locales	Env <sub>5</sub> Consommation en énergie
		T <sub>6</sub> Flexibilité d'absorption de l'installation		

Tous les critères sont bâtis sur un principe commun : ils sont composés de différents éléments répartis sur une échelle d'évaluation permettant de répondre à un questionnaire (cf. § *Chapitre 3*). Nous proposons de décrire chacun d'eux dans l'ordre établi par les colonnes du *Tableau 63* en rappelant l'objectif, la question à laquelle il répond et l'échelle d'évaluation associée.

### 4.1. LES CRITERES DE LA DIMENSION REGLEMENTAIRE

La *Figure 39* rappelle les quatre critères retenus pour la partie réglementaire et montre leur importance relative.



*Figure 39 : Les quatre critères de la partie réglementaire*

#### 4.1.1. R<sub>1</sub> – Respect de la hiérarchie de gestion des déchets

Des travaux ont indiqué qu'il existe plusieurs hiérarchies de gestion des déchets appliquées dans le monde (Europe, Canada, États-Unis en autres)<sup>[183]</sup>. Dans le cadre de notre étude, nous appliquons la hiérarchie de gestion des déchets adoptés par le code de l'environnement, qui permet de répondre à la problématique d'EDF dans un contexte européen et français. La hiérarchie consiste à (i) Prévenir la production de déchets, (ii) Réutiliser, (iii) Recycler, (iv) Valoriser et en dernier à (v) Éliminer. Nous avons fait le choix de scinder en



deux parties le niveau « valoriser » de la hiérarchie pour distinguer la valorisation matière de la valorisation énergétique. Construite sur plusieurs niveaux, la hiérarchie peut être transformée en critère d'évaluation, où les différents niveaux composent l'échelle d'évaluation de notre critère (Tableau 64).

Nous cherchons, via ce critère, à évaluer les installations de gestion de déchets envisagées par rapport à leur positionnement sur l'échelle de la hiérarchie de gestion des déchets<sup>[26]</sup>. Cette démarche a notamment été effectuée par D. Hanan, S. Burnley, et D. Cooke pour le choix d'une stratégie de gestion des déchets papier<sup>[156]</sup>. L'échelle détaillant les différents niveaux de ce critère (Tableau 64) permet de répondre à la question ci-dessous : *Comment se positionne l'installation envisagée par rapport à la hiérarchie de gestion des déchets ?*

Tableau 64 : Échelle d'évaluation du critère R<sub>1</sub>

ÉCHELLE DU CRITERE	REUTILISATION	RECYCLAGE	VALORISATION MATIERE	VALORISATION ENERGETIQUE	ÉLIMINATION
NOTES	0,48	0,27	0,15	0,08	0,03

Préparation en vue de la réutilisation	Recyclage	Valorisation Matière	Valorisation énergétique	Elimination
0,48	0,27	0,15	0,08	0,03

Pour identifier le niveau de la hiérarchie correspondant à l'opération de gestion envisagée, il convient de se rapporter aux Codes R & D (annexe I et II de la directive cadre 2008/98/CE).

Les notes obtenues via l'avis d'experts confirment, évidemment, l'ordre établi par la réglementation, mais montrent une non-linéarité dans la distribution des éléments de l'échelle. La valorisation énergétique est présentée comme proche de l'élimination. En revanche, il apparaît que la réutilisation, le recyclage et la valorisation matière sont des voies à prioriser.

#### 4.1.2. R<sub>2</sub> – Niveau de responsabilité du producteur de déchets

Dans la réglementation, la notion de responsabilité n'est pas clairement définie<sup>[29]</sup>. Il y est précisé que le producteur de déchets est responsable, en théorie, jusqu'à élimination ou la valorisation finale de ses déchets<sup>[46]</sup>. Or, cette responsabilité peut rester engagée au-delà de la prise en charge du déchet par une installation de valorisation ou un éliminateur. À notre connaissance, il n'existe pas de critères permettant de mesurer le niveau de responsabilité d'un producteur de déchets en fonction de l'installation de gestion envisagée. Nous proposons l'échelle d'évaluation ci-dessous (Tableau 65) pour répondre à la question suivante : *La responsabilité du producteur est-elle engagée en sortie d'installation ?*

Tableau 65 : Échelle du critère R<sub>2</sub>

ÉCHELLE DU CRITERE	NON	OUI	JE NE SAIS PAS
NOTES	0,60	0,26	0,14

Non	Oui	"Je ne sais pas"
0,60	0,26	0,14

Pour identifier le niveau correspondant à l'opération de gestion envisagée, il convient de se rapporter au type de BSD à remplir.

Il apparaît, au regard des résultats présentés au tableau ci-dessus, que les experts confirment l'hypothèse « moins est mieux ». Ces résultats montrent également que les experts interrogés préfèrent connaître clairement leur niveau de responsabilité en empruntant une voie de valorisation. En effet, les niveaux « Non » et « Oui »

sont respectivement crédités à 0,60 et de 0,26 d'importance alors que le niveau « peut-être » est désigné comme la pire des solutions.

### 4.1.3. R<sub>3</sub> – Respect du principe de proximité

L'article 16 de la directive-cadre portant sur les déchets et le point 4 de l'article Article L541-1 du Code de l'environnement précisent que le déchet doit être valorisé ou éliminé dans l'une des installations appropriées les plus proches<sup>[26]</sup> afin de respecter un principe de proximité<sup>[46]</sup>. Or ce principe ne peut pas toujours être respecté pour des raisons d'ordre technique<sup>22</sup>, économique<sup>23</sup>, réglementaire<sup>24</sup>, environnemental <sup>25</sup>et/ou territorial<sup>26</sup>. Ces différentes raisons sont couvertes par le code de l'environnement à condition de les justifier. Ces notions font d'ailleurs l'objet de critères indépendants et sont présentées dans ce chapitre.

Les travaux de la littérature montrent que plusieurs méthodes ont été utilisées pour mesurer la proximité. On retrouve les traditionnels indicateurs de distance basée sur la :

- Distance parcourue, ou la distance moyenne parcourue avec un résultat affiché en kilomètre<sup>[185]</sup>.
- Distance parcourue pour une tonne de déchets (km/tonne) ou des tonnes pour un kilomètre (tonne/km)<sup>[139]</sup>.

Ces indicateurs sont principalement utilisés par l'association des maires de France ou l'ADEME pour suivre les plans de gestion des déchets à différentes échelles administratives.

Faustine LAURENT a construit, dans le cadre de sa thèse, un critère de proximité permettant mesurer un besoin éventuel du territoire à développer une solution locale de traitements des déchets organiques. La construction proposée par l'auteur se base sur une échelle administrative<sup>[186]</sup>. Elle considère que ce principe est respecté dès lors qu'une filière de gestion est disponible sur le territoire administratif. Dans le cas contraire, l'auteur propose d'évaluer la proximité d'une filière en comptabilisant les kilomètres parcourus entre le barycentre du territoire et l'installation de traitement.

Dans notre cadre, nous avons décidé de retenir la première construction à savoir, la distance parcourue avec un résultat affiché en kilomètres. L'idée de ce critère est de comparer les installations en fonction de leur éloignement par rapport à la localisation du producteur de déchets. Pour cela, nous avons construit l'échelle de cotation (Tableau 66) afin de répondre à la question suivante : *Est-ce que l'installation choisie répond au principe de proximité ?*

Tableau 66 : Échelle d'évaluation du critère R<sub>3</sub>

RESULTAT DE LA COMPARAISON (en km)	DIFFERENCE ENTRE DEUX INSTALLATIONS DE								
	0 à 50	51 à 200	201 à 300	301 à 400	401 à 500	501 à 600	601 à 700	701 à 800	801 à 900 et plus
ÉCHELLE DE SAATY :	1	2	3	4	5	6	7	8	9

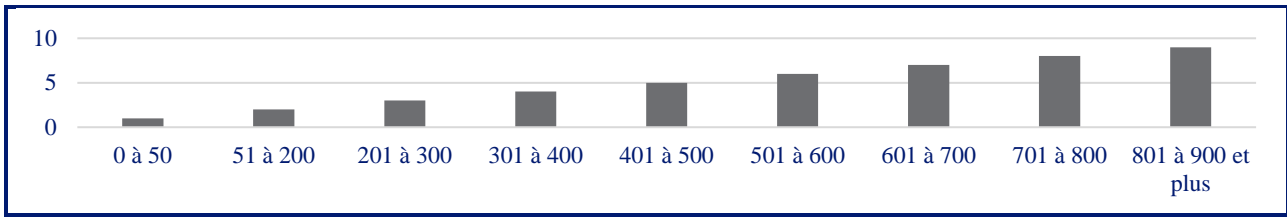
<sup>22</sup> L'incapacité technique de la filière à gérer le flux de déchets localement.

<sup>23</sup> L'installation la moins onéreuse et/ou la viable n'est pas nécessairement la plus proche.

<sup>24</sup> Les filières de valorisation ne sont pas forcément les plus proches.

<sup>25</sup> L'installation la plus proche n'est pas forcément la plus adéquate pour gérer le déchet dans un optimum environnemental.

<sup>26</sup> La planification des déchets est régionale ce qui dans le cas où le gestionnaire se trouve en périphérie, le contraint à rester au sein même du département (et/ou de la région)<sup>[33]</sup>. Alors, il ne peut pas choisir l'installation la plus proche, car celle-ci est située dans un autre département ou région limitrophe<sup>[184]</sup>.



Pour la construction de l'échelle, nous avons simplement fixé une borne minimale et maximale complétée de huit éléments supplémentaires. Il est associé à chacun d'eux une valeur provenant de l'échelle de Saaty (Tableau 66). Nous avons jugé que les échelons de ce critère sont linéaires et qu'ils ne nécessitent pas l'avis d'experts pour la comparaison. On considère que, plus la distance entre le lieu de production du déchet et le lieu de gestion est grande, plus la note est dégradée, de manière linéaire.

Il s'agit ensuite d'intégrer l'indice de l'échelle de Saaty correspondant dans la matrice de comparaison. Une explication de cette démarche est disponible en Annexe 3.4.

#### 4.1.4. R<sub>4</sub> – Positionnement vis-à-vis des objectifs de valorisation

La démarche française s'inscrit pleinement dans le cadre européen. À cet effet, la France s'efforce d'anticiper et d'alimenter ses propositions en matière de prévention, et de réduction des déchets. Les plans de réduction et de valorisation des déchets (2014-2020) présentent des objectifs en matière de recyclage et de valorisation à atteindre d'ici à 2020 pour plusieurs catégories de déchets. À notre connaissance, il n'existe pas de critères directement construits pour évaluer le positionnement d'une stratégie de gestion des déchets par rapport à des objectifs de valorisation pour faire un choix d'orientation. Néanmoins, plusieurs indicateurs proposent de mesurer la réussite d'une stratégie de gestion des déchets sous la forme d'un ratio. Celui-ci permet de mesurer les taux :

- de déchets recyclés par rapport à une quantité collectée<sup>[139]</sup>,
- de mise en décharge<sup>[185]</sup>,
- d'utilisation de déchets solides<sup>[11]</sup>,
- de recyclage d'un déchet particulier<sup>[85]</sup>,
- d'utilisation de matériaux provenant du recyclage<sup>[187]</sup>,
- de valorisation et/ou de recyclage global<sup>[86], [188]</sup>.

Nous avons choisi de ne retenir aucune des solutions présentées ci-dessus. En effet, la construction de ces indicateurs est plus appropriée dans le cadre d'un tableau de bord de suivi des objectifs sur une période donnée. Dans notre contexte, nous cherchons à évaluer le respect de la politique de gestion des déchets (envoi d'un déchet vers une installation) par rapport aux objectifs de valorisation. Il existe des objectifs européens, nationaux et des objectifs propres aux entreprises. Au niveau d'EDF, la liste verte (cf. §Chapitre 1) reprend les orientations européennes et nationales et est également dans certains cas, plus exigeante que les objectifs définis par les pouvoirs publics (Figure 40).

Liste des déchets de la liste verte : v				VALORISATION													ELIMINATION							
Code interne	NATURE DU DÉCHET	liste verte	déchets réglementés	Code E.U.	R 1	R 2	R 3	R 4	R 5	R 6	R 7	R 8	R 9	R 10	R 11	R 12	R 13	D 5	D 8	D 9	D 10	D 13	D 14	D 15
95	a	Emballages - Papiers et cartons (non pollués)	x	DIB	15.01.01	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

■ Type de gestion CORRECTE

■ Type de gestion ACCEPTABLE

■ Type de gestion INTERDITE

■ Type de gestion non appropriée

DI Déchets Inertes

DI Déchets Industriels

B Banals

D Déchets Dangereux

Figure 40 : Extrait de la « Liste Déchets Tableau Codes D et R »

L'idée est d'utiliser ce référentiel et de l'adapter sous la forme de critère afin de comparer les installations étudiées pour un déchet donné, en se basant sur les codes R et D de la directive-cadre. L'échelle proposée (Tableau 67) permet de répondre à la question ci-dessous : *L'installation envisagée permet-elle de répondre aux objectifs de valorisation ?*

Tableau 67 : Échelle du critère  $R_4$

ÉCHELLE DU CRITERE	LA FILIERE EST CORRECTE	LA FILIERE EST ACCEPTABLE	LA FILIERE EST DECONSEILLEE
NOTES	0,69	0,25	0,06
Commentaires	Filière autorisée répondant aux objectifs.	Filière autorisée, mais avec peu de valeur ajoutée (voire nulle) pour répondre aux objectifs	Filière autorisée, mais en contradiction avec les objectifs

Catégorie	Valeur
La filière est correcte	0,69
La filière est acceptable	0,25
La filière est déconseillée	0,06

Pour identifier le niveau de la hiérarchie correspondant à l'opération de gestion envisagée, il convient de se rapporter aux Codes R & D (annexe I et II de la directive cadre 2008/98/CE) et à la liste verte du groupe EDF.

L'ordre d'importance des éléments composant l'échelle du critère est évident, mais les avis d'experts montrent néanmoins l'importance relative de chacun d'eux.

#### 4.1.5. L'importance des critères de la dimension réglementaire

La dimension réglementaire est composée des quatre critères (présentés ci-dessus) où un poids a été défini à chacun d'eux par les experts de cotation. Les résultats montrent que le critère  $R_1$  — *Respect de la hiérarchie de la gestion des déchets* est le critère le plus important (0,52 sur une échelle de 1). Les trois autres critères sont répartis, presque équitablement, de la façon suivante :

- le critère  $R_2$  — *Niveau de responsabilité* a une importance de 0,14,
- le critère  $R_3$  — *Respect du principe de proximité* a une importance de 0,16,
- le critère  $R_4$  — *Positionnement vis-à-vis des objectifs de valorisations* avec une importance de 0,18.

L'Annexe 4.1 regroupe l'ensemble des éléments concernant les pondérations des échelles d'évaluation et le poids des critères de la dimension réglementaire.

## 4.2. LES CRITERES DE LA DIMENSION ÉCONOMIQUE

La dimension économique est cruciale pour le gestionnaire de déchets, mais elle ne doit pas seulement se résumer au montant dont il devra s'acquitter pour traiter et valoriser ou éliminer son déchet. L'étude de cette dimension est complexe à réaliser, car les bases de données sont peu nombreuses et la pression concurrentielle rend les acteurs économiques relativement discrets.

Pour étudier la dimension économique, nous proposons trois critères (Figure 41) inspirés des écrits de Porter<sup>[169], [189]</sup>. Nous avons dû adapter le cadre d'analyse puisque les éléments que propose Porter (cinq forces) sont adaptés pour étudier un marché (de produits et de services) où se rencontrent une offre et une demande or, un déchet, n'est souvent pas considéré comme un produit que des clients vont acheter. De plus, même si un déchet, une fois traité, peut être revendu comme matière secondaire et donc être considéré comme un produit, il est le résultat d'une autre activité principale. On ne peut donc pas envisager de réduire ou d'augmenter les quantités de déchets produites pour adapter l'offre à la demande.

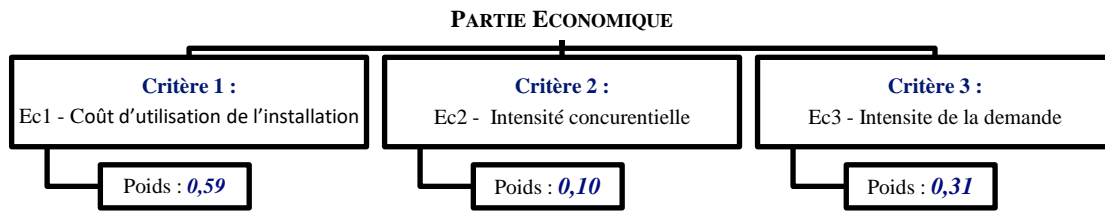


Figure 41 : Les trois critères de la partie économique

### 4.2.1. Ec<sub>1</sub> – Coût d'utilisation de l'installation

Les décideurs opérationnels ont le choix entre différentes orientations pour gérer leurs déchets (les réemployer, les recycler, ou les valoriser) et un coût est associé à chacune de ces possibilités.

Par ce critère, nous cherchons à étudier puis à évaluer le coût final d'utilisation de l'installation envisagée comparativement aux autres solutions étudiées. Le coût comprend à la fois, le coût de traitement de l'installation choisie et le coût lié au transport. Ce critère permet de répondre à la question suivante : *Quel est le coût d'utilisation de l'installation de gestion envisagée ?*

Tableau 68 : Échelle d'évaluation du critère Ec<sub>1</sub>

RESULTAT DE LA COMPARAISON	DIFFERENCE DE X % ENTRE LES INSTALLATIONS									
	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %	90 %	100 %
ÉCHELLE DE SAATY :	1,25	2,18	3,59	4,26	5,61	6,55	7,21	8,29	8,63	9

Les résultats issus des avis d'experts montrent que les équations entre les éléments de l'échelle de cotation sont presque de forme linéaire.

### 4.2.2. Ec<sub>2</sub> – Intensité concurrentielle

L'étude de l'intensité concurrentielle est principalement utilisée pour effectuer des analyses sectorielles. Très peu d'auteurs l'ont définie<sup>[190]</sup>, mais *Michael Porter* propose d'étudier l'intensité concurrentielle comme l'échange des mouvements concurrentiels<sup>[169], [191]</sup>.

Dans notre revue de la littérature, nous avons compris qu'il existe trois principales approches utilisées pour mesurer l'intensité concurrentielle<sup>[190]</sup>. La première est dualiste et se limite à deux concurrents. Il s'agit de mesurer le degré de la lutte concurrentielle par l'observation directe des actions et des ripostes des concurrents. Ces actions et ripostes peuvent être de type marketing (changement de packaging), lié à l'innovation (lancement de nouveaux produits ou de services) et plus récemment, lié aux réseaux sociaux<sup>[192]</sup>. La seconde approche mesure l'intensité concurrentielle en analysant les changements survenus sur un marché. Dans ce cas, il s'agit d'évaluer le nombre de concurrents entrés et en sortis du marché ou d'analyser les changements de parts de marché entre les concurrents (approche des conséquences). Enfin, la dernière approche (l'approche des instruments), oriente l'analyse sur l'étude de la lutte que se livrent les concurrents d'un marché (par rapport aux prix et aux promotions).

Une revue de la littérature plus complète (*Annexe 4.2*) liée à cette notion d'intensité concurrentielle a été effectuée par *Suela BYLYKBASHI* dans le cadre de ses recherches<sup>[190]</sup>.

En dernier lieu, le *Thésaurus de Bercy* propose également des indicateurs pour mesurer l'intensité concurrentielle et de dynamique de marché<sup>[167]</sup>. Le référentiel distingue deux cas, l'intensité concurrentielle dans le cas d'un marché « business to business » et dans le cas d'un marché « business to consumer » (*Tableau 69*). Le détail est disponible en *Annexe 4.3* et *Annexe 4.4*.

Tableau 69 : Extrait des critères de mesure du capital client proposé par le *Thésaurus de Bercy*

DYNAMIQUE DE MARCHÉ BUSINESS TO BUSINESS (B TO B)	DYNAMIQUE DE MARCHÉ BUSINESS TO CONSUMER (B TO C)
La dynamique du marché I ou la dynamique du marché II (les détails sont disponibles en <i>Annexe 4.3</i> )	La taille du marché (les détails sont disponibles en <i>Annexe 4.4</i> .)
Pondéré par un coefficient multiplicateur du risque	Pondéré par un coefficient multiplicateur de croissance

Nous cherchons à évaluer, via ce critère, l'intensité concurrentielle du marché de la filière de gestion envisagée. Il s'agit pour ce critère de répondre à la question suivante : *Quelle est l'intensité concurrentielle de la filière ?*

Dans un contexte de gestion des déchets, où l'objectif principal est de comparer plusieurs installations, l'échelle ci-dessous (*Tableau 70*) permet de mesurer le rapport de force théorique entre le producteur de déchets et les fournisseurs de service (valorisation et élimination). L'échelle de construction part du même principe que celle proposée par le référentiel de Bercy<sup>[167]</sup>, mais adaptée à un contexte de gestion des déchets (moins d'acteurs).

Nous proposons d'évaluer l'intensité concurrentielle des acteurs possibles pour un déchet donné, en mesurant le nombre d'installations (concurrentes) présent dans une filière de valorisation<sup>27</sup>.

Tableau 70 : Échelle du critère *Ec<sub>2</sub>*

ÉCHELLE DU CRITERE	≥ 10	≥ 5	≥ 3	1
NOTES	0,47	0,33	0,14	0,06

Les concurrents représentent ici, le nombre d'installations par filière.

Le sens de lecture est « plus est mieux ». En effet, il est plus avantageux pour un gestionnaire de déchet, s'il y a une intensité concurrentielle.

### 4.2.3. *Ec<sub>3</sub>* – Intensité de la demande

Les filières ont toutes des capacités de traitements différentes, dépendantes du nombre et du type d'installation. Chaque filière a une demande annuelle en déchet, nécessaire pour garantir son fonctionnement, qu'il faut mettre en relation avec la quantité de déchets à gérer. Ce critère a pour objectif de comparer l'intensité de la demande du marché lié au déchet étudié par rapport aux autres filières envisagées. L'échelle détaillant les différents niveaux de ce critère (*Tableau 71*) permet de répondre à la question ci-dessous : *Quelle est la capacité de la filière à traiter la demande ?*

<sup>27</sup> S'il n'y a pas de concurrent alors, il n'y a pas d'intensité concurrentielle.

Il s'agit de vérifier si les capacités de traitement annuelles de la filière<sup>28</sup> sont :

- excédentaires (peuvent accueillir sans investissements supplémentaires des volumes supplémentaires),
- équilibrées,
- limitées (inférieures à la quantité potentielle de déchets à traiter)

Tableau 71 : Échelle du critère Intensité de la demande

ÉCHELLE DU CRITERE	FILIERE AVEC DES CAPACITES EXCEDENTAIRES	FILIERE A L'EQUILIBRE	FILIERE SOUS TENSION (CAPACITES INFERIEURES AUX VOLUMES A TRAITER)
NOTES	0,55	0,33	0,12

Pour identifier le niveau correspondant à l'opération de gestion envisagée, il convient de se rapporter au type de BSD à remplir.

Il est plus avantageux pour un gestionnaire de déchet, s'il y a une demande avec des capacités excédentaires. Une filière sous tension l'oblige à rechercher une seconde filière.

#### 4.2.4. L'importance des critères de la dimension économique

Les résultats montrent que le critère  $Ec_1$  — *Coût de l'installation est le critère le plus important* (0,59 sur une échelle de 1). Les deux autres critères sont répartis de la façon suivante :

- le critère  $Ec_2$  — *intensité concurrentielle* a une importance de 0,10,
- le critère  $Ec_3$  — *Intensité de la demande* a une importance de 0,31.

L'Annexe 4.5 regroupe l'ensemble des éléments concernant les pondérations des échelles d'évaluations et le poids des critères de cette dimension.

### 4.3. LES CRITERES DE LA DIMENSION TECHNIQUE

La Figure 42 ci-dessous montre l'importance relative des six critères retenus de la partie technique.

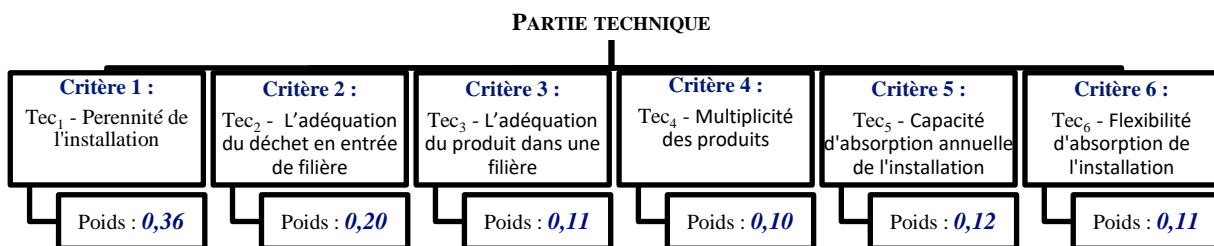


Figure 42 : Les six critères de la partie technique

#### 4.3.1. T<sub>1</sub> – Pérennité de l'installation

La sortie statut de déchet (SDD) nécessite de répondre à plusieurs conditions définies par l'article 6 de la directive-cadre 2008/98 relative aux déchets<sup>[26]</sup>, dont l'une d'elles demande à ce que :

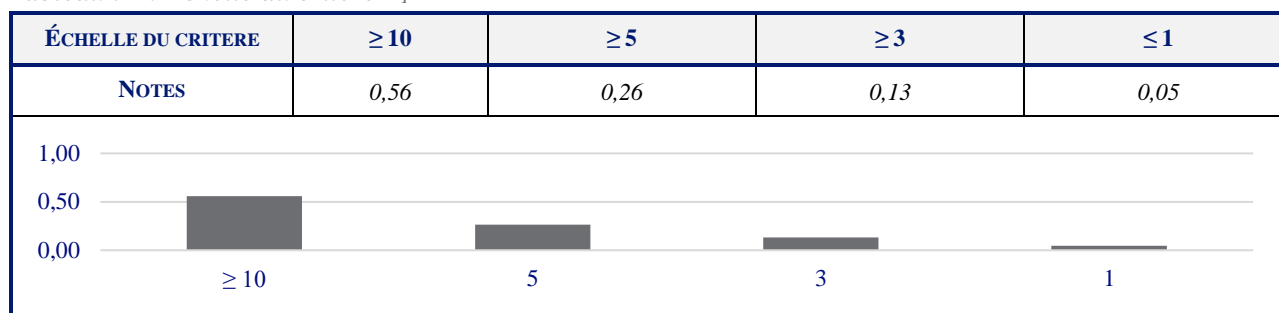
<sup>28</sup> Somme des capacités des installations de cette filière.



« La substance ou l'objet », à savoir le déchet, soit « couramment utilisé à des fins spécifiques »

Nous avons choisi de construire un critère, à partir de ce raisonnement c'est-à-dire, d'évaluer les installations sur une échelle de pérennité dans le temps. Nous supposons que l'installation choisie, qu'elle permette ou non une SDD, est mieux si elle est couramment utilisée pour traiter le déchet. Cette notion rassure le gestionnaire du déchet. Le mot « couramment » a été traduit par une échelle temporelle de plusieurs jalons allant de 1 à plus de 10 ans (Tableau 72). Cette échelle permet de répondre au questionnement ci-dessous : *depuis combien de temps l'installation permet-elle de valoriser (ou d'éliminer) le déchet ?*

Tableau 72 : Échelle du critère T<sub>1</sub>



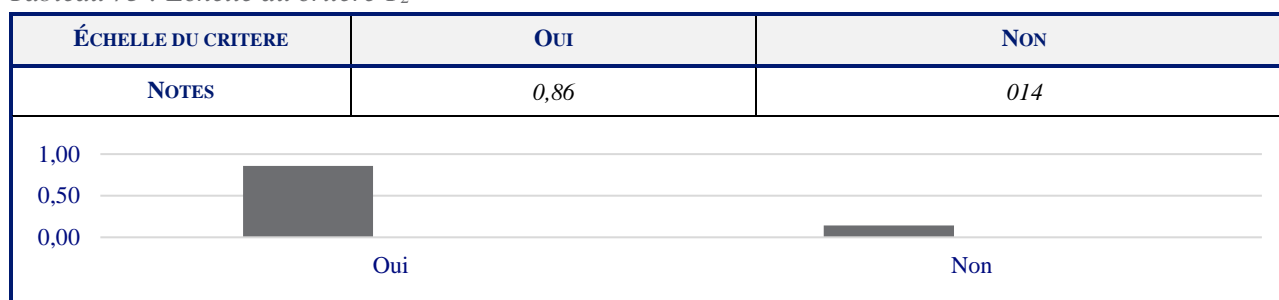
Pour évaluer l'installation envisagée, nous proposons de mesurer cette pérennité à 10, 5, 3 et 1 an(s). Les niveaux 5, 3 et 1 an(s), de l'échelle, sont issus de l'INSEE et correspondent aux taux de survie des entreprises à 5, 3 et 1 an(s)<sup>[193]</sup>. Dans le secteur des déchets, certaines installations sont établies depuis plusieurs années, nous proposons donc d'ajouter, via l'avis des experts de construction, un niveau à 10 ans.

#### 4.3.2. T<sub>2</sub> – Adéquation du déchet en entrée d'installation

Pour qu'un déchet puisse être dirigé vers une voie de valorisation, il doit exister une adéquation entre les caractéristiques techniques requises en entrée de l'installation et celles du flux de déchet<sup>[2]</sup>. Ces prescriptions techniques, autrement dit le cahier des charges, sont établies à partir de guides, de normes ou par la réglementation. Nous proposons de contrôler l'existence (ou non) de cet encadrement (normes, guides) et de vérifier si ces derniers sont suffisamment étayés et reconnus. L'échelle détaillant les deux niveaux de ce critère (Tableau 73) permet de répondre à la question ci-dessous : *Le déchet produit répond-il à des spécifications d'entrée dans l'installation ?*

C'est un critère qualitatif où deux éléments de réponses sont proposés : « oui » et « non » :

Tableau 73 : Échelle du critère T<sub>2</sub>



Il est évident qu'il est plus rassurant pour un gestionnaire de déchets de s'appuyer sur un guide technique reconnu pour vérifier l'adéquation des ses déchets avec l'installation de valorisation.

#### 4.3.3. T<sub>3</sub> – Adéquation du produit dans une filière

Lorsqu'un déchet a été valorisé, une nouvelle ressource (un produit) est créée. Celle-ci dispose alors de ses propres caractéristiques intrinsèques. Elle doit respecter la législation et les normes applicables aux produits

ou répondre à un cahier des charges pour être utilisée convenablement. Nous proposons de contrôler l'existence (ou non) de l'ensemble de cet encadrement (normes, guides) et de vérifier si ces derniers sont suffisamment étayés et reconnus. L'échelle détaillant les différents niveaux de ce critère (*Tableau 74*) permet de répondre à la question ci-dessous : *La substance ou l'objet produit répond-il à des spécifications précises ?*

Ce questionnement permet de connaître si la ressource créée (issu de la transformation du déchet) en sortie d'installation peut être utilisée à une fin utile. Nous avons construit ce critère à partir de l'article 6 de la directive-cadre 2008/98 relative à la sortie du statut de déchets (SDD)<sup>[26]</sup>. Lorsqu'un déchet a subi une opération de valorisation ou de recyclage, il doit répondre, en autres, à la condition suivante : « *La substance ou l'objet remplit des exigences techniques aux fins spécifiques et respecte la législation et des normes applicables aux produits* »

Nous proposons de construire ce critère sur une échelle qualitative, avec les éléments suivants : « *oui* » et « *non* » :

Tableau 74 : Échelle du critère T<sub>3</sub>

ÉCHELLE DU CRITÈRE	OUI	NON
NOTES	0,86	014

Catégorie	Valeur
Oui	0,86
Non	0,14

#### 4.3.4. T<sub>4</sub> – Multiplicité des produits

Lorsqu'un déchet est valorisé, une nouvelle ressource est créée. Il s'agit pour les niveaux « recyclage » et « valorisation matière » de la hiérarchie de gestion des déchets, de matières premières de recyclage (MPR) et de matières premières secondaires (MPS). Ces dernières sont produites dans l'objectif de se substituer à des matières premières primaires (MPP) en quantité finie<sup>29</sup>. Ces matières disposent alors de leurs propres caractéristiques intrinsèques qui, dans certains cas, leur permettent d'être utilisées à plusieurs fins.

Une recherche approfondie sur les débouchés de MPR ou MPS, nous a menés à une étude publiée par l'association RECORD *sur la mise en place d'une approche multicritères pour le choix d'une filière de valorisation matière/énergie des déchets plastiques*<sup>[195]</sup>. Cette étude a notamment créé un critère « débouché » qui mesure, qualitativement, le potentiel de réutilisation des matières secondaires. Nous avons choisi de ne pas retenir ce critère, puisque celui-ci est composé de plusieurs sous-critères qui font un double comptage avec des critères économiques et techniques de notre référentiel.

Nous avons alors créé un critère permettant de mesurer le nombre de possibilités d'utilisation du produit (issu du déchet) en sortie d'installation. On considère qu'une installation de valorisation est d'autant plus intéressante que la ressource créée a plusieurs débouchés d'utilisation. L'échelle détaillant les différents niveaux de ce critère (*Tableau 75*) permet de répondre à la question ci-dessous : *Quel est le nombre de possibilités d'utilisation de la nouvelle ressource à ce jour ?*

<sup>29</sup> Les indicateurs MPS (matières premières secondaires) et MPR (matières premières de recyclage) renseignent sur la capacité à réutiliser les produits en substitutions à des matières premières primaires<sup>[194]</sup>.

Tableau 75 : Échelle du critère T<sub>4</sub>

ÉCHELLE DU CRITERE	≥ 10	≥ 3	1 ou 2
NOTES	0,64	0,26	0,10

#### 4.3.5. T<sub>5</sub> – Capacité d’absorption annuelle de l’installation

Les installations de gestion des déchets disposent de leurs propres caractéristiques de fonctionnement. L’une d’entre elles est la capacité de traitement annuelle. Celle-ci est définie par les caractéristiques techniques de l’installation, via ses équipements, mais aussi par son arrêté préfectoral d’exploitation.

Nous cherchons à partir de ce critère à évaluer la capacité de l’installation envisagée à prendre en charge la quantité de déchet produite. L’échelle détaillant les différents niveaux de ce critère (Tableau 76) permet de répondre à la question ci-dessous : *La capacité de traitement annuelle de l’installation permet-elle de répondre au besoin du gestionnaire de déchets ?*

Tableau 76 : Échelle du critère T<sub>5</sub>

ÉCHELLE DU CRITERE	≥ 200	100	≥ 100	≥ 50
NOTES	0,47	0,31	0,13	0,07

Le niveau « ≥ 200 % » représente une installation capable de prendre en charge le double du tonnage absorbé annuellement. Les niveaux « < 100 % » et « ≤ 50 % » représentent des installations ne pouvant accepter qu’une partie du tonnage annuel, et impliquent que le gestionnaire de déchet doit obligatoirement trouver une installation complémentaire (< 100 %), voire plusieurs (≤ 50 %).

**Remarque :** Ce critère est aussi étudié dans la dimension économique, mais pas à l’échelle de l’installation mais à l’échelle de la filière (cf. EC<sub>3</sub> – Intensité de la demande)

#### 4.3.6. T<sub>6</sub> – Flexibilité d’absorption de l’installation

Une autre des caractéristiques des installations de gestion des déchets est la capacité à accepter des fluctuations quantitatives de déchets sur une période donnée.

Nous cherchons à partir de ce critère à évaluer la capacité de l’installation envisagée à prendre en charge des fluctuations temporelles du volume de déchets. On a défini, via les avis d’experts de construction, qu’une fluctuation temporaire correspond à la capacité d’une installation d’accepter une quantité supplémentaire de déchets produits (en tonne) de 20 %, répartie sur 2 semaines tous les 2 mois (Figure 43).

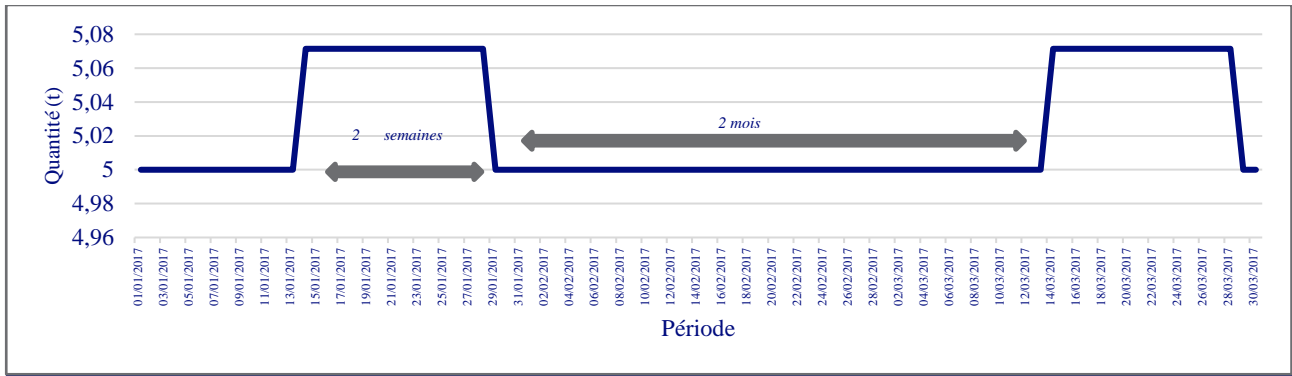


Figure 43 : Représentation graphique de la fluctuation temporaire

Nous souhaitons répondre, via ce critère, à la question suivante : *Est-ce que l'installation de gestion de déchet peut supporter une flexibilité quantitative ?*

Nous proposons de construire ce critère sur l'échelle, qualitative : « oui » ou « non », ci-dessous :

Tableau 77 : Échelle du critère  $T_6$

ÉCHELLE DU CRITERE	OUI	NON
NOTES	0,84	0,16

La flexibilité d'une installation industrielle est un atout puisqu'en cas d'aléas temporaires, il n'est pas obligatoirement nécessaire de rechercher une nouvelle installation.

#### 4.3.7. L'importance des critères de la dimension technique

Les résultats montrent que les critères  $T_1$  — *Pérennité de la filière* et  $T_2$  — *Adéquation du déchet* en entrée d'installation sont les critères les plus importants avec respectivement un score de 0,36 et 0,20 sur une échelle de 1. Les quatre autres critères sont répartis presque équitablement de la façon suivante :

- le critère  $T_3$  — *Adéquation du produit dans une filière* a une importance de 0,11,
- le critère  $T_4$  — *Multiplicité des produits a une importance* de 0,10,
- le critère  $T_5$  — *Capacité d'absorption annuelle de l'installation* a une importance de 0,12,
- le critère  $T_6$  — *Flexibilité d'absorption de l'installation* a une importance de 0,11.

L'Annexe 4.6 regroupe l'ensemble des éléments concernant les pondérations des échelles d'évaluations et le poids des critères de cette dimension.

### 4.4. LES CRITERES DE LA DIMENSION TERRITORIALE

Le territoire est un espace géographique sur lequel a lieu l'interaction entre l'entité productrice et l'installation de gestion de déchets, mais également avec les collectivités<sup>30</sup> qui peuvent faciliter cette interaction et en tirer profit. Cette interaction dépend des spécificités propres à chaque territoire, notamment des infrastructures de transport et des incitations à valoriser les déchets localement (acceptabilité et volontarisme). À l'inverse, le

<sup>30</sup> Ce sont les régions qui portent la compétence de la gestion des déchets, formalisée dans les plans régionaux de prévention et de gestion des déchets (PRPGD).

choix d'orientation du gestionnaire de déchet vers une installation implique des impacts positifs et négatifs pour les territoires concernés. La valeur créée peut être la contribution à l'économie locale, à l'emploi et l'apport de nouvelles ressources nécessaires au territoire.

Aujourd'hui, cette dimension n'est pas ou très peu abordée dans les études, car il est difficile de quantifier la valeur apportée au territoire, l'ancrage local ou l'intérêt d'un territoire par rapport à un autre.

Dans notre contexte, nous proposons les critères ci-dessous (Figure 44).

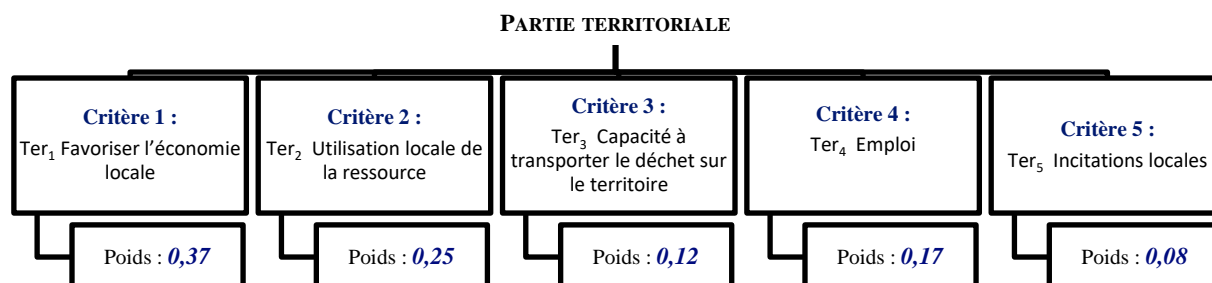


Figure 44 : Les cinq critères de la partie territoriale

#### 4.4.1. Ter<sub>1</sub> – Favoriser l'économie locale

Dans la littérature, les termes *favoriser l'économie locale* renvoient principalement au développement durable ou à l'économie de proximité via la mise en place d'un agenda 21<sub>[196]</sub>. Néanmoins, il existe également de nombreuses autres formes d'économie de proximité<sub>[197], [198]</sub>. Cette dernière peut être évaluée par des distances physiques, des temps de transport, des coûts de transport, des coûts de communication et, dans certains cas, être mesurée selon une appartenance culturelle ou administrative ou encore via la méthodologie « Local FootPrint<sub>[199]</sub> ».

Nous proposons de construire l'échelle de ce critère sur la base des échelons administratifs français. Bien que les régions aient à présent les compétences sur la planification de gestion des déchets<sub>[33]</sub>, nous avons choisi d'utiliser un découpage administratif plus fin (Tableau 78). Nous considérons en effet que plus l'installation est éloignée du lieu de production du déchet, moins elle contribue au développement économique du territoire où se trouve le gestionnaire du déchet. Nous souhaitons évaluer, au travers de ce critère, la capacité de l'installation choisie à participer au développement local du territoire. Cette activité économique se traduit par une contribution à l'emploi local, aux ressources financières des collectivités (via les taxes sur la valeur ajoutée des entreprises par exemple), à l'image du territoire et pose ainsi les bases du développement futur<sub>[168], [200], [201]</sub>.

L'échelle détaillant les différents niveaux de ce critère (Tableau 78) permet de répondre à la question suivante : *À quelle maille territoriale l'économie est-elle favorisée par le choix de cette installation ?*

Tableau 78 : Échelle d'évaluation du critère Ter<sub>1</sub>

ÉCHELLE DU CRITÈRE	LOCAL <sup>31</sup>	DEPARTEMENT	REGION	FRANCE	HORS FRANCE
NOTES	0,44	0,30	0,15	0,08	0,03

<sup>31</sup> Échelle communale, regroupement de communes

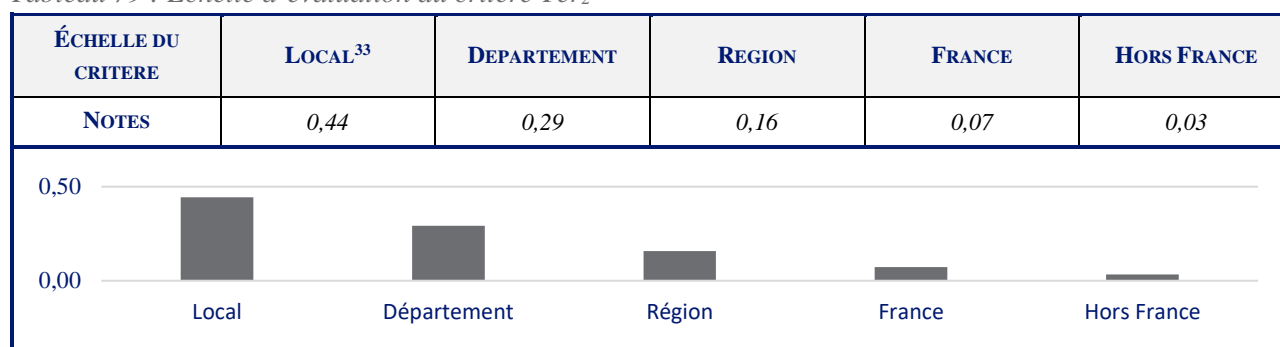
#### 4.4.2. Ter<sub>2</sub> – Utilisation locale de la ressource

Dans la littérature, *l'utilisation locale de la ressource*, renvoie principalement aux bouclages de flux dans les territoires. On retrouve cette notion dans les concepts d'écologie industrielle et territoriale, des achats durables et de l'éco conception<sup>[31]</sup>. La gestion des ressources d'un territoire trouve plusieurs guides et indicateurs<sup>[202]</sup>, <sup>[203]</sup>, mais tous n'ont pas la même définition de la ressource<sup>[203]</sup>, <sup>[204]</sup>. Dans le cadre de nos travaux, nous appelons ressources, les matières premières secondaires (MPS) ou matières premières de recyclage (MPR) créées par une installation de valorisation.

Pour ce critère, nous nous intéressons au choix (indirect<sup>32</sup>) du gestionnaire de déchet à participer au développement local du territoire. En effet, si la ressource nouvellement créée est utilisée à un niveau administratif différent de son lieu de production, alors elle ne répond pas à un besoin particulier du territoire. Pour cela, on regarde la proximité entre le lieu de production de la nouvelle ressource, issue de la valorisation du déchet, et son lieu d'utilisation. L'échelle détaillant les différents niveaux de ce critère (Tableau 79) permet de répondre à la question suivante : *À quelle maille territoriale la ressource permet-elle de répondre à un besoin ?*

Nous avons choisi, pour une question d'homogénéité, d'utiliser la même échelle que le critère précédent :

Tableau 79 : Échelle d'évaluation du critère Ter<sub>2</sub>



#### 4.4.3. Ter<sub>3</sub> — Capacité à transporter le déchet sur le territoire

Les travaux de la littérature montrent que le transport, qu'il soit de marchandises ou de personnes, dessine la dynamique interne du territoire et sa capacité à interagir avec les autres<sup>[205]</sup>. A ce jour, le transport des déchets se fait majoritairement par transport routier<sup>[206]</sup>. Néanmoins, plusieurs collectivités et territoires s'intéressent à des alternatives et aux transports multimodaux<sup>[207]</sup>, <sup>[208]</sup>.

Plusieurs indicateurs ont été développés pour mesurer l'importance du réseau de transport sur un territoire. On peut citer par exemple les indicateurs développés par le projet COMETHE<sup>34</sup> ou les nombreux indicateurs territoriaux de développement durable<sup>35</sup> proposés par le ministère de l'Environnement via le Service de l'Observation et des Statistiques (SOeS) et l'Observatoire des territoires (CGET)<sup>[206]</sup>, <sup>[209]</sup>.

<sup>32</sup> Le résultat est une conséquence du choix de l'installation fait par le gestionnaire au critère 1.

<sup>33</sup> Échelle communale, regroupement de communes

<sup>34</sup> COMETHE (Conception d'Outils METHodologiques et d'évaluation pour l'Ecologie industrielle. L'outil (un des résultats du projet), propose dans sa grille d'évaluation technique de privilégier les modes de transport type fluvial ou ferroviaire. Ce projet de 3 ans (2008-2011), avait pour objectif de concevoir des outils d'aide à la décision pour la mise en œuvre de l'écologie industrielle sur un territoire.

<sup>35</sup> Toutes ces données de niveau régional et départemental sont accessibles et téléchargeables.

Nous cherchons, via ce critère, à comparer les installations par rapport à la capacité à transporter le déchet jusqu'à leur territoire. Pour cela, on utilise l'échelle départementale (assez fine pour distinguer les réseaux de transport tout en permettant d'avoir les données nécessaires). Le critère est composé de 2 sous-critères :

- (1) la surface des réseaux de transport du département où se situe l'installation de valorisation (ou d'élimination),
- (2) l'importance de la diversité des moyens de transport (routier, fluvial et ferroviaire) transport de la région où se situe l'installation de valorisation (ou d'élimination).

Nous avons choisi d'étudier uniquement le territoire final (département pour le premier sous-critère et régional pour le second). En effet, le territoire du gestionnaire de déchet est le même quelle que soit l'installation choisie et nous considérons que l'itinéraire emprunté entre le territoire de départ et d'arrivée est optimisé (utilisation de grands axes) donc équivalent quelle que soit l'installation choisie.

#### 4.4.3.1. Ter<sub>3,1</sub> – Importance du réseau de transport du territoire

Ce sous-critère permet d'évaluer le taux de développement des infrastructures de transport présentes sur le département où l'installation de gestion des déchets est implantée.

Il permet de répondre à la question suivante : *Quelle est la capacité du territoire à transporter le déchet ?*

On calcule le ratio entre la surface occupée par les réseaux de transport et la surface totale du département où l'installation de gestion des déchets est implantée. On évalue ainsi le maillage du réseau du département final. On considère qu'un maillage important facilite l'accès à l'installation.

Les données utilisées sont obtenues à partir de l'indicateur OC30 — *Occupation du territoire* via la Base de données régionale et départementale sur l'environnement, l'énergie, le transport, le logement et la construction.

**Remarque :** Nous avons jugé que les résultats issus de ce critère sont linéaires et qu'ils ne nécessitent pas l'avis d'experts pour la construction.

#### 4.4.3.2. Ter<sub>3,2</sub> – Importance de la diversité des moyens de transport du territoire

Ce sous-critère permet de mesurer la diversité des modes de transport présents sur le département final (routier, ferroviaire et fluvial). Il s'agit, pour ce critère, de répondre à la question suivante : *Le territoire dispose-t-il d'une diversité des moyens de transport ?*

Pour construire ce critère, nous sommes partis du principe que le territoire idéal (avec la plus grande diversité) possède les 3 modes de transport répartis équitablement, soit 1/3 chacun. (Tableau 80).

Tableau 80 : Diversité idéale des moyens de transport

MODE DE TRANSPORT :	ROUTIER	RAIL	FLUVIAL
Représentation sur le territoire en %	33,33	33,33	33,33

Le principe de construction du sous-critère est basé sur une comparaison des régions françaises par rapport à cet idéal. Les pourcentages des moyens de transport sont obtenus à l'aide des indicateurs de flux de marchandises TR10 — *Transport de marchandises*. Un territoire possédant une diversité idéale obtient donc la note 0. Plus le territoire s'éloigne de l'idéal, plus son score est élevé. Ainsi, un territoire peut obtenir au maximum le score de 133, s'il n'a qu'un seul mode de transport, soit  $|100-33| + |0-33| + |0-33| = 67 + 33 + 33 = 133$ .

Par exemple, dans une région où 80 % du transport de marchandises se fait par route, 0 % en fluvial et 20 % en ferroviaire, le territoire obtient la note de  $|80-33| + |0 - 33| + |20 - 33| = 47 + 33 + 13 = 93$ .



**Remarque :** La construction proposée ne permet pas de prendre en compte l’avis d’experts.

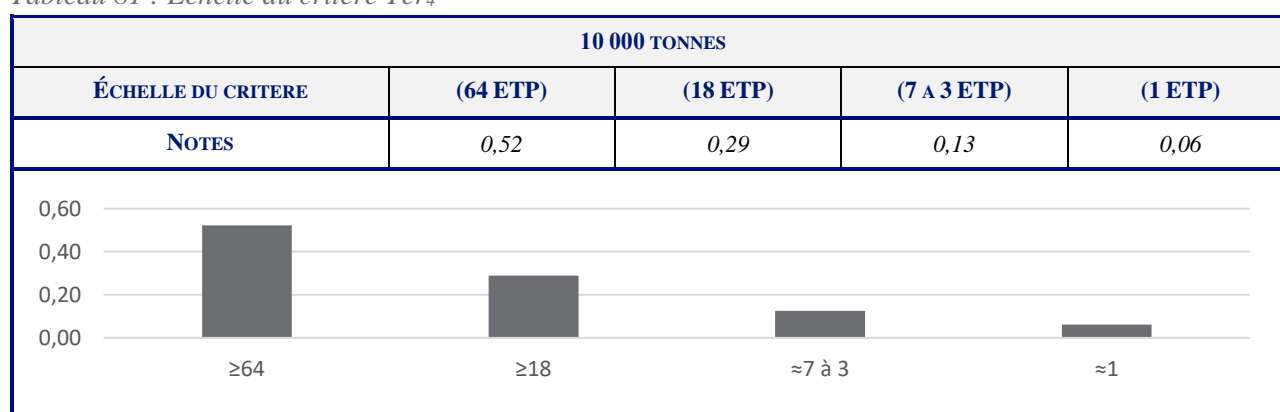
#### 4.4.4. Ter<sub>4</sub> – Emploi

Dans un contexte particulier, mélangeant économie circulaire, développement durable, crise économique et sociale, l’emploi est au cœur des préoccupations. En 2014, l’emploi dépasse légèrement son niveau d’avant la crise<sup>36</sup>, mais avec des situations contrastées dans les nouvelles régions<sup>[210]</sup>. Recherché par les élus des territoires, l’emploi non délocalisable permet de garantir des effets économiques sur le territoire<sup>[31]</sup>. La littérature montre qu’il existe plusieurs indicateurs traitants de l’emploi. Ces derniers détaillés en *Annexe 4.7*.

Dans notre contexte, nous cherchons, au travers de ce critère, à répondre à la question suivante : *Quel est le nombre d’employés nécessaire pour traiter le déchet dans l’installation envisagée ?*

Pour y répondre, nous proposons de retenir l’échelle ci-dessous (*Tableau 81*) :

*Tableau 81 : Échelle du critère Ter<sub>4</sub>*



Le critère permet de mesurer les emplois « directs » présents sur le site de gestion des déchets. Les emplois indirects et induits ne sont pas pris en compte.

**Remarque :** Compte tenu de la diversité des filières de gestion possible (et donc de la difficulté pour obtenir toutes les données), nous avons choisi de classer les filières selon la nomenclature suivante (*Tableau 82*) :

*Tableau 82 : Nombre d’emplois en ETP en fonction des filières (d’après la bibliographie)*

10 000 TONNES					
REEMPLOI ET REUTILISATION	RECYCLAGE ET/OU VALORISATION MATIERE		VALORISATION ÉNERGETIQUE		ÉLIMINATION
	64 ETP <sup>37</sup>	18 ETP	36 ETP	7 ETP	
[19]	[8], [211]		[212]	[19]	[19]

Il s’agit de comparer les installations envisagées, via le nombre d’employés nécessaire pour gérer 1 tonne de déchet. Si l’effectif précis n’est pas disponible, nous utiliserons les données fournies par les sources identifiées du *Tableau 82*. De plus, dans le cas où une installation nécessite 23 ETP pour assurer son fonctionnement, nous nous servirons des équations des droites qui ont été établies à partir des pondérations données par les avis d’experts (*Tableau 83*).

<sup>36</sup> En France métropolitaine.

<sup>37</sup> Équivalent temps plein.

Tableau 83 : Équations pour l'emploi

10 000 TONNES			
≥ 64 ETP	> 64 ETP ET ≤ 18 ETP	> 18 ETP ET ≤ 7 A 3 ETP	> 7 A 3 ETP ET 1 ETP
0,52	$Y = ax+b$	$Y = ax+b$	$Y = ax+b$

#### 4.4.5. Ter<sub>5</sub> – Incitations locales (politique, économique, réglementaire)

Ce critère vise à mesurer les incitations locales pour la gestion des déchets. Ces incitations, si elles existent, favorisent **l'acceptation locale** d'une installation de gestion de déchet ou peuvent donner lieu à des aides (techniques ou financements publics) pour des projets de gestion des déchets. De plus, elles permettent d'améliorer l'image du gestionnaire de déchets qui pratique une gestion en **adéquation avec la volonté du territoire**.

*Existe-t-il des incitations locales pour favoriser une filière de gestion du déchet ?*

Pour y répondre, on propose de mesurer les incitations locales à l'aide de 3 sous-critères :

- la dynamique d'EIT sur le territoire, traduit par le nombre de démarches d'Écologie Industrielle et Territoriale (EIT) dans la région,
- la sensibilité territoriale pour la valorisation des déchets, traduit par le nombre d'initiatives Zéro Gaspillage Zéro déchet (ZGZD) dans la région,
- l'ambition territoriale pour la gestion des déchets.

##### 4.4.5.1. Ter<sub>5.1</sub> – Dynamique d'Économie Industrielle et Territoriale (EIT) sur le territoire

L'Écologie industrielle et territoriale est l'un des 7 piliers de l'économie circulaire<sup>[19]</sup>. Nous cherchons à évaluer la proactivité du territoire (collectivités et acteurs économiques) pour une gestion des déchets locale et dans un contexte d'économie circulaire. Le nombre de démarches est mesuré à l'échelle départementale. Les données sont obtenues à partir d'un recensement établi par EDF en 2016<sup>[213]</sup>.

Tableau 84 : Échelle critère Ter<sub>5.1</sub>

ÉCHELLE DU CRITERE	≥ 40	≥30	≥20	≥ 10
NOTES	0,47	0,29	0,16	0,08

EIT (traduite par le nombre de projets sur le territoire) permet d'évaluer la proactivité du territoire (collectivités et acteurs économiques) pour une gestion des déchets locale et dans un contexte d'économie circulaire.

##### 4.4.5.2. Ter<sub>5.2</sub> – Sensibilité territoriale pour la valorisation des déchets

Dans la même idée que le sous-critère précédent (cf. §4.4.5.2), il s'agit d'évaluer la proactivité des collectivités pour la gestion des déchets dans un contexte d'économie circulaire. Les appels à projets « territoires zéro déchet, zéro gaspillage », lancés par le ministère de l'Environnement et portés par l'ADEME, ont permis de repérer et d'accompagner les collectivités territoriales qui s'engagent dans une démarche ambitieuse de

prévention, de réutilisation et de recyclage de leurs déchets, en particulier des déchets ménagers<sup>38</sup>. Ces territoires déclinent ainsi de manière opérationnelle les avancées de la Loi de Transition Énergétique pour la Croissance Verte (LTECV) en matière d'économie circulaire.

Nous proposons la construction suivante pour l'échelle du critère :

Tableau 85 : Échelle critère Ter<sub>3,2</sub>

ÉCHELLE DU CRITERE	≥ 7	≥5	≥3	1
NOTES	0,46	0,29	0,16	0,08

La **sensibilité territoriale pour la valorisation des déchets** (mesurée en nombre d'initiatives Zéro Gaspillage Zéro Déchet<sup>39</sup> sur le territoire) montre l'engagement des collectivités pour la valorisation des déchets. Néanmoins, il faut relativiser l'intérêt de ces démarches pour EDF car elles concernent principalement des déchets ménagers ou assimilés.

#### 4.4.5.3. Ter<sub>5,3</sub> – Ambition territoriale pour la gestion des déchets

Dans le cadre de la loi NOTRe, les Conseils Régionaux portent la responsabilité de la planification territoriale de la prévention et de la gestion des déchets<sub>[33]</sub>. Ils doivent décliner les objectifs nationaux et européens à une échelle régionale. Pour ce critère, il s'agira de regarder si le plan régional de gestion des déchets opte pour des objectifs plus ambitieux ou similaires à ceux proposés par la France. Nous proposons la construction d'échelle suivante :

Tableau 86 : Échelle du critère Ter<sub>5,3</sub>

ÉCHELLE DU CRITERE	OUI, OBJECTIFS PLUS AMBITIEUX	NON, OBJECTIFS SIMILAIRES
NOTES	0,78	0,22

L'**ambition territoriale pour la gestion des déchets** transparait dans les plans régionaux de prévention et de gestion des déchets (PRPGD) qui peuvent opter localement pour des objectifs supérieurs, donc plus ambitieux, ou similaires à ceux proposés par la France dans la loi de transition énergétique. La rédaction de ces plans est sous la responsabilité de la région, qui prend donc en compte les caractéristiques du territoire (déchets produits, installations de gestion disponibles...). Outre les objectifs fixés dans ces plans, il est intéressant de participer à la réflexion lors de leur rédaction, en tant que producteur de déchets, notamment pour anticiper les volumes importants de déchets de déconstruction.

<sup>38</sup> 153 territoires ont été désignés lauréats lors de deux appels à projets successifs (58 territoires fin 2014, et 95 territoires fin 2015).

<sup>39</sup> Territoire Zéro Gaspillage Zéro Déchet : initié par le ministère de l'Environnement et portés par l'ADEME, ce label distingue et apporte des moyens aux collectivités qui s'engagent dans une démarche ambitieuse de prévention, de réutilisation et de recyclage des déchets.

#### 4.4.6. L'importance des critères de la dimension territoriale

Les résultats montrent que les critères *Ter<sub>1</sub> — Favoriser l'économie locale* et *Ter<sub>2</sub> — Utilisation locale de la ressource* sont les critères les plus importants avec respectivement un score de 0,37 et 0,25 sur une échelle de 1. Les quatre autres critères sont répartis presque équitablement de la façon suivante :

- le critère *Ter<sub>4</sub> — Emploi* a une importance de 0,17,
- le critère *Ter<sub>3</sub> — Capacité à transporter le déchet* a une importance de 0,12,
- le critère *Ter<sub>5</sub> — Incitations locales* a une importance de 0,08.

L'Annexe 4.8 regroupe l'ensemble des éléments concernant les pondérations des échelles d'évaluation et le poids des critères de cette dimension.

### 4.5. LES CRITERES DE LA DIMENSION ENVIRONNEMENTALE

L'économie circulaire cherche à limiter les impacts environnementaux des activités humaines. Il est donc important de pouvoir comparer les installations d'un point de vue environnementale. La minimisation des impacts environnementaux est une préoccupation de plus en plus importante apparue avec le code de l'environnement et le régime des ICPE. C'est également la dimension la plus étudiée et discutée par la communauté scientifique dans le cadre de la gestion des déchets.

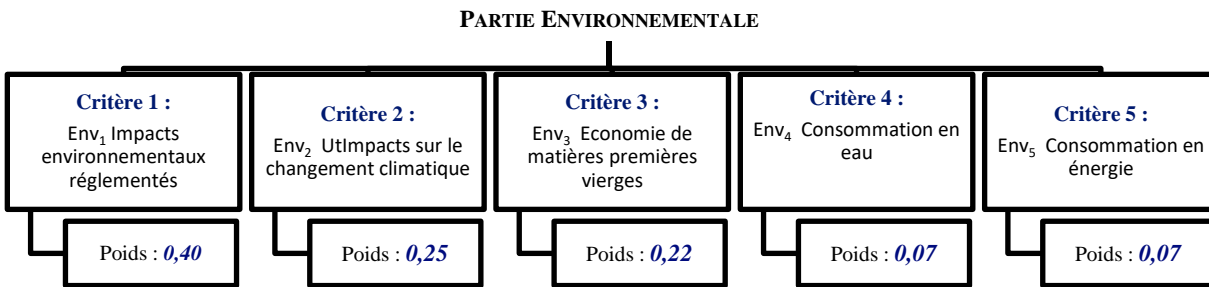


Figure 45 : Les cinq critères de la dimension environnementale

#### 4.5.1. Env<sub>1</sub> – Impacts environnementaux réglementés

Chaque installation de gestion des déchets est soumise à la réglementation ICPE<sup>40</sup>. L'ensemble de ces installations, qu'elles soient soumises à déclaration, enregistrement ou autorisation, doivent respecter les prescriptions qui leur sont applicables. Ces dernières sont établies par la réglementation nationale et précisées par des arrêtés préfectoraux<sup>[214]</sup>.

Ce critère permet de vérifier que l'envoi du déchet dans une installation n'aura pas d'effets négatifs sur l'environnement. L'échelle détaillant les différents niveaux de ce critère (Tableau 87) permet de répondre à la question suivante : *L'utilisation du déchet dans l'installation aura-t-elle un effet négatif sur l'environnement ?*

Pour l'évaluation, nous proposons la construction suivante :

<sup>40</sup> Installation Classée pour la Protection de l'Environnement.

Tableau 87 : Échelle du critère Env<sub>1</sub>

ÉCHELLE DU CRITERE	NON, SANS IMPACT	REMIS EN CAUSE	OUI, IL Y A UN IMPACT
NOTES	0,70	0,24	0,06

Catégorie	Notes
Sans Impact	0,70
Remis en cause	0,24
Avec impact	0,06

Afin d'établir la relation entre l'installation et l'échelle présentée, nous proposons de mesurer l'absence ou la présence d'impacts, via le nombre de mises en demeure ayant trait à l'environnement (Tableau 88). En effet, lorsque des écarts sont constatés lors des contrôles menés par les inspecteurs des installations classées, l'installation est mise en demeure. C'est une demande formelle du préfet de mise en conformité de l'installation par rapport aux prescriptions imposées à l'exploitant de l'ICPE.

Tableau 88 : Mise en demeure

ÉCHELLE	NOMBRE DE MISE EN DEMEURE
Non, Sans Impact	0
Remis en cause	1
Oui, il y a un impact	≥ 2

Il est possible de vérifier si l'installation a été mise en demeure pour des raisons environnementales par rapport à son arrêté d'exploitation, sur le site internet installation classée.

Quand des écarts sont constatés lors des contrôles menés par les inspecteurs des installations classées, l'arrêté de mise en demeure précise les raisons de mise en demeure et présente les demandes formelles du préfet pour la mise en conformité par rapport aux prescriptions d'exploitation.

Pour compléter l'analyse, l'année de la mise en demeure est disponible. Si elle est ancienne, l'installation a dû se mettre en conformité pour ne plus avoir d'impact local sur l'environnement. Cette mise en conformité est signalée sur le site internet des installations classées.

#### 4.5.2. Env<sub>2</sub> – Impacts sur le changement climatique

EDF s'est engagée à réduire ses émissions directes de CO<sub>2</sub> de 40 % d'ici 2030, en passant de 51 millions de tonnes en 2017 à 30 millions de tonnes en 2030. Les émissions liées à la valorisation de ses déchets ne sont pas prises en compte dans ce calcul, lié au mix énergétique. Néanmoins, les réduire participe à la stratégie bas-carbone du groupe EDF.

Le changement climatique est défini comme conséquence des émissions de GES dans l'atmosphère. On appelle « effet de serre » l'augmentation de la température moyenne de l'atmosphère induite par l'augmentation de la concentration atmosphérique moyenne de diverses substances. Aujourd'hui, l'indicateur d'impact sur le changement climatique est majoritairement utilisé par rapport aux autres catégories d'impacts<sup>[50]</sup>. Cette observation s'explique par le fait qu'il existe un consensus scientifique par rapport à sa méthodologie de construction<sup>[68], [215]</sup>.

L'indicateur d'impact sur le changement climatique est basé sur l'estimation du CO<sub>2</sub> équivalent émis lors de ces étapes du cycle de vie. Dans notre cas, il s'agit de prendre en compte les impacts liés à l'installation choisie et aux étapes de transport du déchet afin de comparer les installations entre elles par rapport à leurs émissions de gaz à effet de serre (GES). Ce critère permet de répondre au questionnement suivant : *Quelle quantité de gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub> eq) est potentiellement émise par l'installation ?*

Tableau 89 : Échelle d'évaluation du critère Env<sub>2</sub>

RESULTAT DE LA COMPARAISON	DIFFERENCE DE X % ENTRE LES INSTALLATIONS									
	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %	90 %	100 %
ÉCHELLE DE SAATY :	1,28	2,14	2,85	4,57	5,57	6,28	7,51	8,57	9	9

Il existe des études ACV pour beaucoup de filières, mais il faut cependant faire attention au périmètre pris en compte et aux sources de données utilisées.

### 4.5.3. Env<sub>3</sub> – Économie de matières premières vierges

Les activités humaines font peser un certain nombre de pressions sur l'environnement. Outre les émissions de gaz à effet de serre, la consommation de ressources et l'extraction de matières premières vierges posent également des problèmes environnementaux. L'utilisation des ressources excède largement la capacité d'assimilation et de renouvellement des écosystèmes. Le jour du dépassement correspond à la date de l'année (2 août en 2017) où l'humanité est supposée avoir consommé l'ensemble des ressources que la planète est capable de régénérer en un an. L'un des enjeux de l'économie circulaire est de limiter l'utilisation des matières premières vierges (ressources naturelles), non renouvelables à l'échelle humaine, comme le pétrole, le gaz, les minerais...

Quand on valorise un déchet, on le transforme en une ressource (granulats, compost, énergie...), appelée matière première secondaire (MPS) ou matière première de recyclage (MPR) si elle se substitue à une ressource naturelle. On peut donc s'interroger sur l'économie de ressources naturelles générée par la valorisation d'un déchet dans une filière donnée, d'où la question suivante. Il s'agit pour ce critère d'établir un bilan matière de l'installation de valorisation et d'en déduire la quantité évitée de matières premières vierges issue de la transformation du déchet. L'échelle proposée ci-dessous permet de répondre à la question suivante : *La nouvelle ressource peut-elle se substituer aux matières premières vierges extraites ?*

Tableau 90 : Échelle du critère Env<sub>3</sub>

ÉCHELLE DU CRITERE	≥ 80 %	≥ 60 %	≥ 40 %	≥ 20 %
NOTES	0,56	0,27	0,12	0,04

#### 4.5.4. Env<sub>4</sub> – Consommation en eau

Selon les territoires, les enjeux sur la consommation d'eau sont plus ou moins prononcés, mais partagés par tous, car l'eau est considérée comme un bien commun. On peut donc légitimement se poser la question de l'impact de la valorisation des déchets sur la consommation en eau.

*Quelle est la consommation d'eau de l'installation ?*

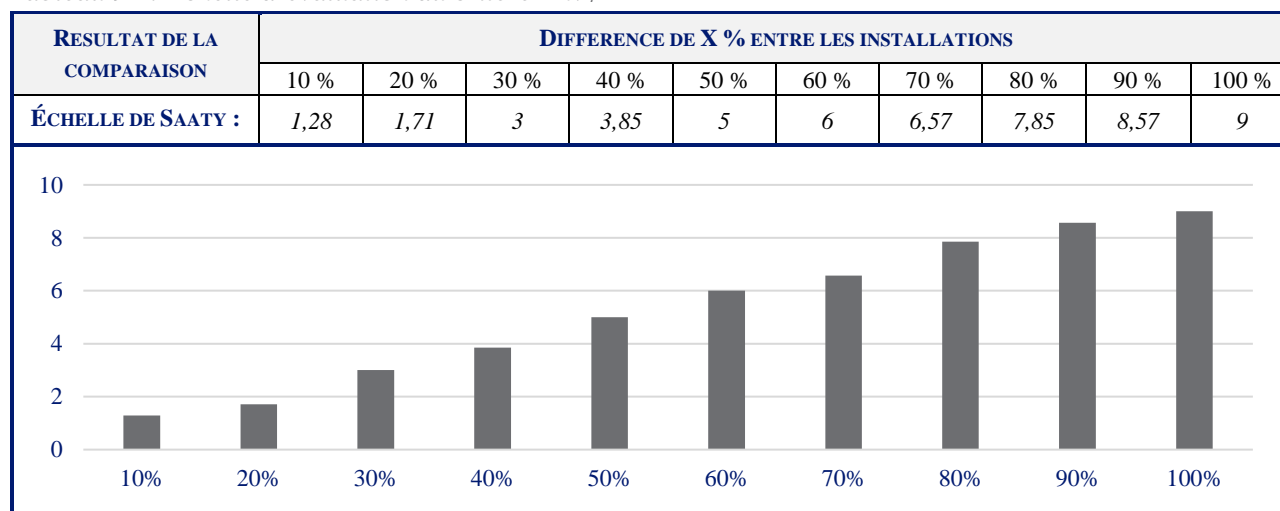
La consommation d'eau prend en compte les consommations directes liées au traitement de fin de vie (valorisation ou élimination) du déchet. Il faut évidemment rapporter le volume d'eau total au tonnage de déchets à traiter. L'objectif de ce critère est de comparer les installations entre elles et éventuellement de sensibiliser sur l'efficacité d'une installation par rapport au reste de sa filière.

L'information n'est pas toujours disponible, mais peut faire partie des informations demandées en même temps que le devis pour la gestion du déchet.

L'indicateur de consommation d'eau n'est pas à proprement parlé un indicateur d'impacts sur l'environnement, mais plutôt un indicateur de flux. Il est exprimé en m<sup>3</sup> et est calculé en sommant les flux d'eau consommée pendant le processus de valorisation (ou d'élimination).

L'objectif de ce critère est de comparer les installations entre elles par rapport à leur consommation en eau. Il permet de répondre au questionnement suivant : *Quel est le volume d'eau utilisé (m<sup>3</sup>) par l'installation de gestion des déchets ?*

Tableau 91 : Échelle d'évaluation du critère Env<sub>4</sub>



#### 4.5.5. Env<sub>5</sub> – Consommation en énergie

De même que pour la consommation d'eau, on peut s'interroger sur l'efficacité énergétique des installations (énergie/tonne de déchet).

*Quelle est la consommation énergétique de l'installation ?*

Cette question peut amener à se demander si l'installation utilise les meilleures techniques disponibles pour la consommation d'énergie. L'énergie primaire totale représente la somme de toutes les sources d'énergie qui sont directement puisées dans les réserves naturelles telles que le gaz, le pétrole, le charbon, le minerai d'uranium, la biomasse et l'énergie hydraulique. L'énergie primaire totale est divisée en énergie non renouvelable et énergie renouvelable.



Tableau 92 : Échelle d'évaluation du critère Env5

RESULTAT DE LA COMPARAISON	DIFFERENCE DE X % ENTRE LES INSTALLATIONS									
	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %	90 %	100 %
ÉCHELLE DE SAATY :	1,28	1,78	3,14	3,64	4,71	5,64	6,14	7,35	8	8,5

#### 4.5.6. L'importance des critères de la dimension environnementale

Les résultats montrent que le critère *Env1 – Impacts environnementaux réglementés* est le critère le plus important avec un score de 0,40 sur une échelle de 1. Les autres critères sont répartis presque équitablement par paire de la façon suivante :

- le critère *Env2 – Impacts sur le changement climatique* a une importance de 0,25,
- le critère *Env3 – Économie de matières premières* a une importance de 0,22,
- le critère *Env4 – Consommation en eau* a une importance de 0,07,
- le critère *Env5 – Consommation en énergie* a une importance de 0,07.

L'Annexe 4.9 regroupe l'ensemble des éléments concernant les pondérations des échelles d'évaluation et le poids des critères de cette dimension.

**Remarque :** Les consommations d'eau et d'énergie représentent des poids inférieurs à 10 % de la note environnementale d'après les experts interrogés. Ce sont donc des éléments de moindre importance, qui permettent rarement de distinguer les installations d'un point de vue environnemental. Néanmoins, ce sont des thématiques environnementales sur lesquelles il est pertinent de s'interroger pour les impacts globaux de consommation de ressources. Les consommations d'eau et d'énergie font partie des principaux indicateurs suivis par l'ONU et la France pour mesurer les effets des politiques de développement durable.

## 4.6. DISCUSSION

Cette liste de 23 critères a évolué au cours des travaux de thèse. En effet, certains critères créés et construits, ont été classés comme « non retenus » (Tableau 93) après l'avis des experts de construction ou suite, à un test sur le cas des déchets amiantés (cf. §Chapitre 5). Les critères non retenus sont présentés au Tableau 93 ci-dessous.

Tableau 93 : Les critères éliminés

DIMENSIONS	CRITERES	COMMENTAIRES
REGLEMENTAIRE	ÉVOLUTION DE LA DANGEROUSITE	Nous cherchions à savoir via ce critère si, la filière conduit à enlever définitivement le caractère dangereux du déchet. Une échelle d'évaluation avait été proposée en fonction du nombre de propriétés dangereuses [HP1 à HP15] portant par exemple sur le caractère explosif, infectieux, inflammable, cancérigène, toxique. Pour déterminer l'efficacité de la filière, il convenait de passer en revue l'ensemble des propriétés de danger identifiées sur le déchet avant l'entrée dans la filière et après le traitement. Nous avons décidé de ne pas retenir ce critère pour plusieurs raisons : [i], la dangerosité peut être maîtrisée et ainsi diminuer le risque pour l'environnement

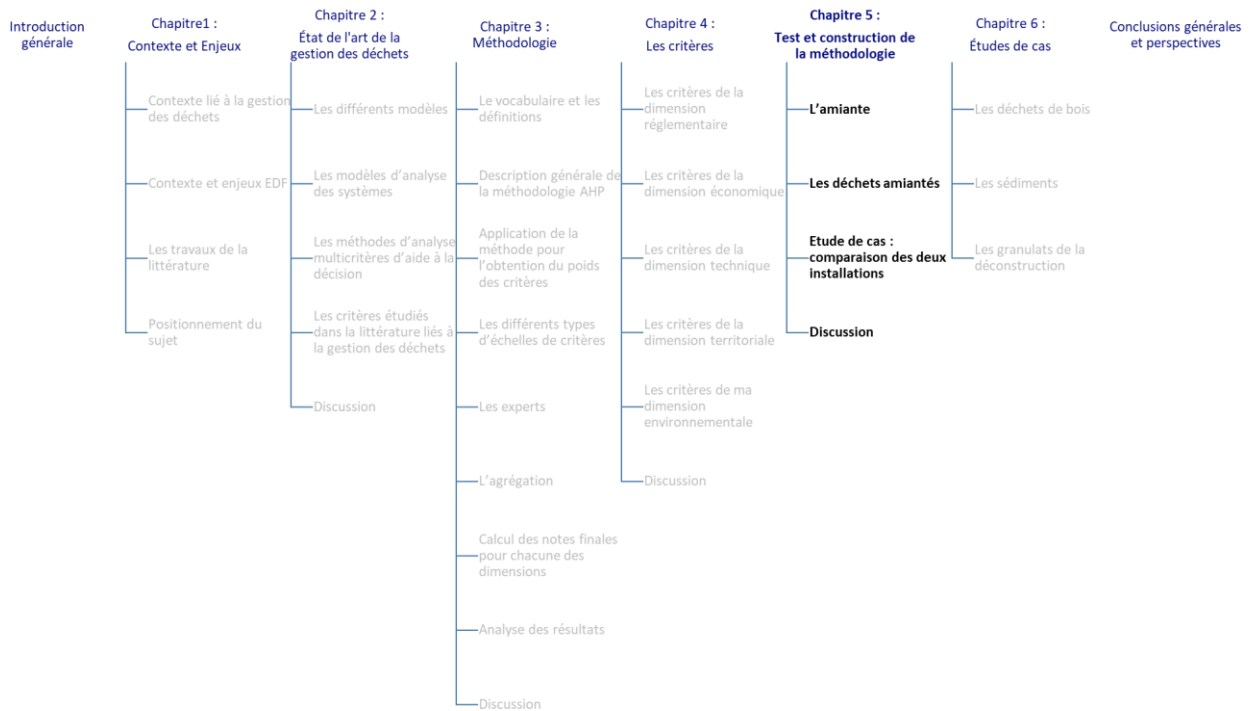
DIMENSIONS	CRITERES	COMMENTAIRES
		(des produits dangereux sont manipulés tous les jours) et [ii] ce critère ne s'adapte pas à tous les déchets.
REGLEMENTAIRE	<b>LA « COMPLEXITE » DU TRANSPORT ET LE PRINCIPE DE PROXIMITE</b>	Ce critère n'a pas été retenu dans sa construction initiale. Nous avons choisi de garder que la partie « principe de proximité ». En effet, la complexité du transport n'est pas réellement un critère, mais plus une problématique d'organisation. De plus, le transport dit « complexe » (principalement lié à la dangerosité du déchet) est suivi par la réglementation où des consignes et des recommandations sont décrites.
REGLEMENTAIRE	<b>SORTIE DU STATUT DE DECHET</b>	Le questionnement lié à ce critère était de savoir si la sortie du statut de déchet (SDD) pouvait être un point positif lors d'un choix d'installation et donc être un critère de comparaison. Un début de construction d'échelle d'évaluation composée des 4 éléments suivants avait été proposé : (i) Possible (retour d'expérience) ? (ii) En cours d'élaboration (à court terme) ? (iii) Prévu à long terme ? (iv) Irréaliste ? Par la suite, nous avons décidé de ne pas retenir ce critère. En effet le statut de déchet n'est pas un inconvénient. De plus, très peu de déchets sont concernés par cette procédure.
REGLEMENTAIRE	<b>INFLUENCE DE LA REGLEMENTATION SUR LA FILIERE</b>	Nous cherchions à savoir, au travers de ce critère, si la réglementation influence la filière et si, elle est plus ou moins contraignante. Ce critère n'a pas été retenu pour la dimension réglementaire. Aucune échelle n'avait été proposée au moment de la réflexion. Actuellement, le principe de ce critère est présent dans la dimension territoriale au critère Te5.3 L'ambition territoriale.
REGLEMENTAIRE	<b>TAUX DE RETOUR/CONFORMITE DES BSD</b>	Le bordereau de suivi des déchets est un document qui fait partie du dispositif de contrôle des circuits de traitements des déchets. Il a pour objectif de regrouper des informations sur le déchet concerné, tel que son élimination ou encore les intermédiaires qui ont pris en charge le déchet. Ce bordereau s'inscrit dans le principe de la responsabilité du producteur et constitue traçabilité du parcours. En effet, ce dernier assure la traçabilité et identifie tous les acteurs de la filière : producteur, transporteur, installation de stockage ou de traitement. En fin de parcours, l'éliminateur ou l'entreprise de valorisation a l'obligation légale de renvoyer une copie du bordereau au producteur de déchets dans un délai de 30 jours. Nous voulions comparer les installations à partir de leurs taux de retour et de conformité des BSD. Nous avons décidé de ne pas retenir ce critère. En effet, lorsqu'une entreprise ne répond pas à cette obligation, le producteur doit le signaler aux pouvoirs publics concernés. De plus, EDF souhaite comparer des installations qui respectent la réglementation en vigueur.
ENVIRONNEMENTALE	<b>FILIERE EN DEMARCHE SME ISO 14001</b>	Nous cherchions à comparer les installations par rapport à la certification ISO 14001. En effet, le référentiel ISO 14001 permet de mettre en place une démarche environnementale structurée et adaptée à chaque entreprise. Celui-ci s'intègre dans le cadre du « développement » dit « durable » et s'appuie sur une démarche volontaire d'amélioration continue. Or, dans le monde industriel, cette certification est admise (d'autant plus dans le secteur des déchets). Il était alors impossible de comparer les installations sur cette base et nous avons décidé de ne pas retenir ce critère qui a été jugé non pertinent.
ENVIRONNEMENTALE	<b>EPUISEMENT DES RESSOURCES ABIOTIQUES</b>	Les activités humaines nécessitent l'extraction de ressources naturelles (bois, pétrole, minerai de fer, etc.). Ces ressources sont pour parfois non renouvelables et il se pose alors la question de leur épuisement. On s'intéresse ici à l'épuisement des ressources abiotiques, c'est-à-dire les ressources non vivantes (minerai, etc.) extraites de la géosphère vers la technosphère. Il est très difficile de définir un indicateur objectif et stable dans le temps. En effet, en fonction des innovations et des découvertes de gisements, les ressources connues évoluent. De plus, certaines ressources sont très abondantes à la surface de la Terre et il devient difficile (pour certains déchets) de montrer une véritable « économie » de ressources dans le cadre d'une valorisation. <i>Marchand</i> précise que cet impact est calculé à 22 % dans les ACV déchets. De plus ce dernier est à utiliser avec précaution dans les études. Nous avons donc décidé de ne pas retenir ce critère, qui se serait avéré non pertinent pour les déchets et les voies de valorisation étudiée dans le cadre de nos travaux (bois, granulats de la déconstruction par exemple)
ECONOMIQUE	<b>LES SUBSTITUTIONS POSSIBLES</b>	Ce critère est principalement utilisé pour des analyses sectorielles. Bien que cette notion soit largement utilisée en gestion. Ce critère fait partie des 5 forces permettant de mesurer la robustesse d'un marché. A notre connaissance, ce critère n'a pas été utilisé dans le cadre de la gestion des déchets, mais plutôt dans le secteur Agro-Alimentaire (ex : Danone, Coca-cola) et High-Tech (ex : Archos, IBM, Microsoft). Porter propose de mesurer le pouvoir de substitution par 2 critères, la performance du produit substitué et le coût du changement. En

DIMENSIONS	CRITERES	COMMENTAIRES
		<p>effet, il explique que si le rapport du prix sur la performance du produit de substitution est dans le même ordre de grandeur ou équivalent, et que le coût de transfert supporté par les clients n'est pas élevé alors il y a une menace sur le marché existant. Ce critère a pour objectif de fournir des informations les filières de substitutions possibles à la filière de gestion envisagée. Il s'agit de mesurer le nombre de substitutions éventuellement envisageable pour une filière et le déchet étudié. Nous avons décidé de ne pas retenir ce critère puisque le nombre de substitutions est toujours le même.</p>

Nous sommes conscients de ne pas être exhaustifs dans les critères à prendre en compte. Néanmoins, pour chacune des dimensions nous pensons avoir identifié les « bonnes » questions à se poser pour l'orientation d'un flux de déchets vers une installation de valorisation.

Dans le chapitre suivant, nous proposons de vérifier le fonctionnement de nos critères sur le cas des déchets amiantés.

# CHAPITRE 5 : TEST DU MODELE SUR LE CAS DES DECHETS AMIANTES



## RESUME

L'amiante est une problématique importante pour l'entreprise, mais les exutoires sont limités puisqu'il n'existe aujourd'hui que 2 filières de traitement reconnues en France : la valorisation via une installation de vitrification ou l'élimination en installation de stockage de déchets dangereux. Tout oppose ces 2 voies d'orientation pour les déchets amiantés.

Ainsi, nous testons les critères retenus sur le cas des déchets amiantés afin de vérifier l'application des échelles de critères, des pondérations, des méthodes d'agrégations et de la méthodologie générale. Plusieurs cas d'étude ont été menés et présentés en COPIL<sup>41</sup> de thèse. La démarche et les résultats ont été une base de réflexion pour la validation ou non des critères retenus.

<sup>41</sup> Comité de pilotage

## SOMMAIRE DU CHAPITRE 5

<b>INTRODUCTION</b>	<b>131</b>
<b>5.1. LES DECHETS AMIANTES</b>	<b>132</b>
5.1.1. Les déchets contenant de l'amiante libre (ou lié à un matériau non intègre)	132
5.1.2. Les déchets contenant de l'amiante lié à un support inerte et intègre	133
5.1.3. La réglementation relative aux déchets amiantés	134
5.1.4. Les filières de gestion des déchets amiantés	135
5.1.5. La valorisation : INERTAM (inertage par vitrification)	136
5.1.6. L'élimination : Installations de stockage de déchets (ISDND)	137
5.1.7. L'élimination : Installations de stockage de déchets (ISDD)	138
5.1.8. L'enjeu des déchets amiantés pour EDF	138
<b>5.2. ÉTUDE DE CAS : COMPARAISON DES DEUX INSTALLATIONS</b>	<b>140</b>
5.2.1. Dimension réglementaire	141
5.2.1.1. Critère R1 — Respect de la hiérarchie de la gestion des déchets	141
5.2.1.2. Critère R2 — Niveau de responsabilité	141
5.2.1.3. Critère R3 — Respect du principe de proximité	142
5.2.1.4. Critère R4 — Positionnement vis-à-vis des objectifs de valorisation	143
5.2.1.5. Résultats de la comparaison sur la dimension réglementaire	143
5.2.1.6. Analyse de sensibilité des résultats sur la dimension réglementaire	143
5.2.2. Dimension économique	144
5.2.2.1. Critère Ec1 — Le coût d'utilisation de l'installation	145
5.2.2.2. Critère Ec2 — Intensité concurrentielle	146
5.2.2.3. Critère Ec3 — Intensité de la demande	146
5.2.2.4. Résultats de la comparaison sur la dimension économique	147
5.2.3. Dimension territoriale	148
5.2.3.1. Critère Ter1 — Favoriser l'économie locale	148
5.2.3.2. Critère Ter2 — Utilisation locale de la ressource	148
5.2.3.3. Critère Ter3 — Capacité à transporter le déchet sur le territoire	148
5.2.3.4. Critère Ter4 — Emploi	149
5.2.3.5. Critère Ter5 — Les incitations locales	150
5.2.3.6. Résultats sur la dimension territoriale	150
5.2.4. Dimension environnementale	150
5.2.4.1. Critère Env1 — Les impacts environnementaux réglementés	150
5.2.4.2. Critère Env2 — Impact sur le changement climatique	151
5.2.4.3. Critère Env3 — Économie de ressources vierges	151
5.2.4.4. Critère Env4 — La consommation en eau	152
5.2.4.5. Critère Env5 — La consommation en énergie	152
5.2.4.6. Résultats sur la dimension environnementale	152
5.2.5. Dimension technique	152
5.2.5.1. Critère T1 — Pérennité de l'installation	152
5.2.5.2. Critère T2 — Adéquation du déchet en entrée d'installation	153
5.2.5.3. Critère T3 — Adéquation du produit dans une filière	153
5.2.5.4. Critère T4 — Multiplicité d'utilisation du produit	154
5.2.5.5. Critère T5 — Capacité d'absorption annuelle de l'installation	154
5.2.5.6. Critère T6 — Flexibilité d'absorption de l'installation	154
5.2.5.7. Résultats sur la dimension technique	154
5.2.6. Synthèse de la comparaison	155
<b>5.3. DISCUSSION</b>	<b>155</b>

## INTRODUCTION

La gestion des déchets amiantés est une problématique importante pour EDF, car la société a lancé de nombreuses opérations de déconstruction des plus anciennes centrales thermiques, en plus des opérations de maintenance opérées sur le parc en exploitation (thermique, hydraulique...). En 2015, le groupe EDF a généré plus de 2500 tonnes de déchets potentiellement amiantés. La gestion de ces déchets est particulièrement intéressante du fait qu'elle passe par des filières existantes depuis longtemps. Les gestionnaires de déchets sont alors confrontés au choix entre une installation de valorisation et une installation d'élimination. C'est donc un cas simple, à choix tranché, retenu pour tester le modèle.

L'amiante est une fibre minérale naturelle<sup>[216]</sup>. Ce mot désigne six minéraux fibreux présents dans la nature que l'on peut classer en 2 groupes :

- les Serpentes : composées de fibres longues, flexibles et recourbées. Il s'agit principalement de fibre « chrysotile » (ou amiante blanc) et c'est le principal type d'amiante utilisé en France,
- les Amphiboles : composées de fibres droites et raides sont partagées en cinq sous-catégories :
  - la crocidolite (amiante bleu),
  - l'amosite (amiante brun),
  - l'actinolite,
  - l'anthophyllite,
  - et la trémolite.

En Europe, l'utilisation de l'amiante n'est pas anodine et son application est répandue dans plusieurs domaines dont notamment celui de la construction de bâtiment (*Figure 46*)<sup>[217]</sup>. En 1973 (année de la plus forte consommation et de production d'amiante), la communauté européenne consomme près de 832 000 tonnes d'amiante dont plus de 92 % sont de l'amiante chrysotile (amiante-ciment et dalle-amiante)<sup>[218]</sup>.

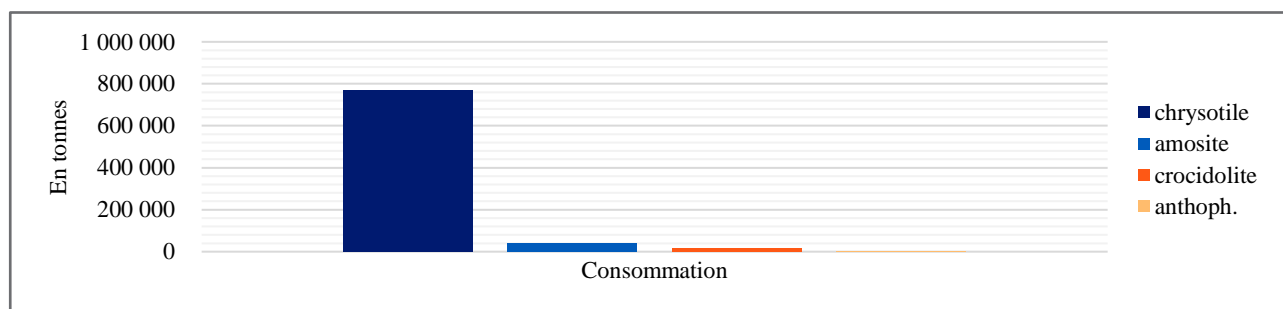


Figure 46 : Les catégories d'amiantes consommées dans la Communauté européenne en 1973

En France, avant le décret du 24 décembre 1996, la consommation annuelle d'amiante était de l'ordre de 150 000 tonnes. Pendant des dizaines d'années et jusqu'en 1980, la France a été l'un des sept grands producteurs avec l'exploitation de mines en Corse et en Savoie. Pour combler une demande importante et grandissante de l'amiante, la France importe également une grande quantité de ce matériau jusqu'en 1997. En effet, en 1995, plus de quatre millions de tonnes ont été importées sur le territoire national, dont plus de la moitié provient des mines du Canada. Les mines d'Afrique du Sud, de l'ex-URSS et de l'Italie complètent la seconde moitié.

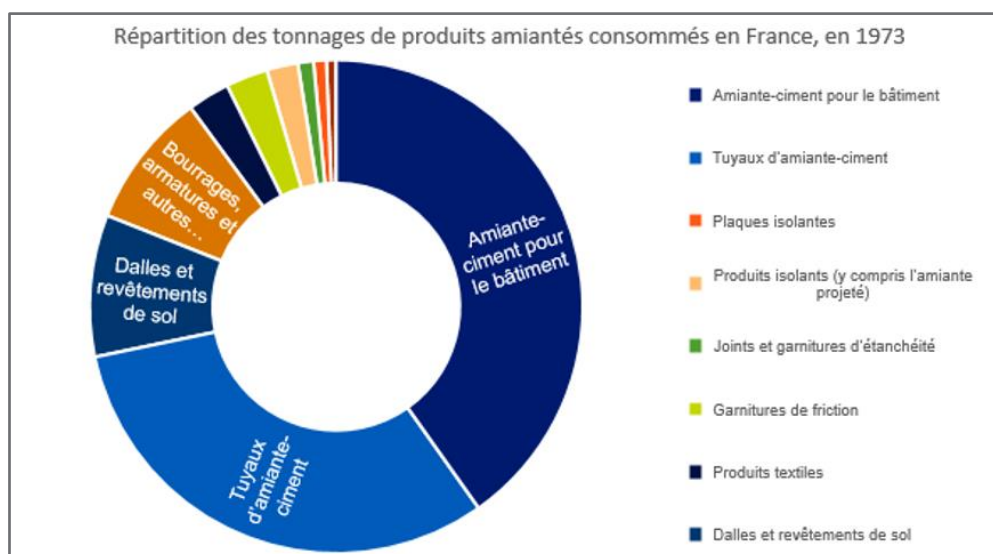


Figure 47 : La répartition des tonnages de produits amiantés consommés en France, en 1973

La raison pour laquelle l'amiante a été utilisé de manière si importante est due à ses caractéristiques techniques. En effet, les fibres d'amiante sont résistantes à la chaleur, au feu, à la décomposition chimique et biologique, à l'usure et à la rupture. Ce matériau dispose également d'excellentes capacités dans l'isolation thermique, électrique et acoustique<sup>[219]</sup>.

En dépit de sa dangerosité, l'amiante a été massivement utilisé dans le monde et notamment en France. Aujourd'hui, la réglementation sur les déchets amiantés permet de protéger l'environnement, les salariés exposés, mais aussi la population (santé publique). Les principales utilisations de cette matière ont été l'amiante-ciment, les dalles-amiante et le flocage. Selon l'ADEME, les déchets d'amiante issus du secteur du BTP représentent environ 90 % des déchets d'amiante en France<sup>[220]</sup>. C'est donc un gisement de déchets important et d'actualité, car le secteur du BTP est en pleine « rénovation » du fait des programmes type loi de transition énergétique.

## 5.1. LES DECHETS AMIANTES

Même si tous les déchets amiantés ont le statut de déchets dangereux, on distingue deux catégories principales de déchets d'amiante : les **déchets d'amiante libre** d'une part et les **déchets contenant de l'amiante lié à un matériau inerte** ayant conservé son intégrité d'autre part. Les déchets d'amiante lié ayant perdu leur intégrité (usure, découpage...) sont considérés comme appartenant à cette dernière catégorie<sup>[221]</sup>.


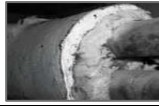






### 5.1.1. Les déchets contenant de l'amiante libre (ou lié à un matériau non intègre).

Il est regroupé dans cette « catégorie » les déchets les plus dangereux et nocifs pour l'environnement et la santé humaine. On y retrouve les déchets d'amiante ou amiantés dont les fibres peuvent aisément se disperser dans l'environnement (poussières, boues, matériau non intègre). Les déchets d'amiante des matériels et équipements de désamiantage (principalement des EPI<sup>42</sup>) sont également présents dans cette catégorie de déchet. Le *Tableau 94* ci-après illustre les principaux déchets classés en tant qu'amiante libre :

<sup>42</sup> Équipement de Protection Individuel.



Tableau 94 : Les principaux déchets classés en tant qu'amiante libre

NOM	ILLUSTRATION	NOM	ILLUSTRATION
Les flocages		Les enduits et plâtres	
Les calorifugeages		Les feutres d'amiante	
Les boues d'amiante en vrac		Les filtres à air, gaz ou liquides	
Les cartons d'amiante		Les terres amiantées	
Les tresses et textiles en amiante		Les produits rigides altérés	

### 5.1.2. Les déchets contenant de l'amiante lié à un support inerte et intègre

La majorité des déchets amiantés sont issus des matériaux de la construction. Ces derniers ne présentent pas de réel danger pour l'environnement et la santé humaine tant que leur intégrité est conservée. Pour être répertoriés dans cette catégorie, les déchets doivent être intègres et inertes. Premièrement, le fait que le matériau ait conservé son intégrité signifie qu'il ne peut pas libérer de fibres d'amiante. Pour que le caractère intègre du matériau soit garanti, il ne faut pas qu'il ait été coupé, usiné ou qu'il se soit effrité avec le temps. Deuxièmement, un matériau est jugé inerte s'il ne subit aucune décomposition, aucune réaction physique, chimique ou biologique, ni aucune combustion pendant son stockage. L'unique risque de dispersion des fibres d'amiante ne peut intervenir que lors de perçage, de broyage ou lors de la manipulation non conforme.

Cette catégorie regroupe principalement l'amiante-ciment sous forme de plaques ondulées, de tuyaux et de canalisation. Ces différents éléments regroupent l'essentiel du gisement des déchets amiantés.

Le *Tableau 95* ci-dessous synthétise les principaux déchets classés en tant qu'amiante lié à des matériaux inertes et intègres :

Tableau 95 : Les principaux déchets classés en tant qu'amiante lié à des matériaux inertes et intègres.

NOM	ILLUSTRATION	NOM	ILLUSTRATION
Les plaques ondulées		Les panneaux d'isolation	
Canalisation en fibrociment		Les éléments de bardages	

**Remarque :** les déchets contenant de l'amiante sont catégorisés comme des déchets dangereux, même lorsque ces derniers sont liés à des matériaux inertes et intègres.

L'ADEME estime à 22 millions de tonnes la quantité de déchets amiantés présente sur le territoire national (Tableau 96). Principalement utilisé dans le BTP (90 %), le gisement de déchets amiantés est présent dans la majorité des bâtiments construits avant 1997<sup>[220]</sup>.

Tableau 96 : L'estimation des principaux déchets classés en tant qu'amiante lié à des matériaux inertes et intègres

PRODUITS	TONNAGE EN MILLIONS DE TONNES
Plaques ondulées et plaques profilées diverses	13
Plaques support de tuiles	1,5
Ardoises	1,5
Plaques planes	2
Tuyaux enterrés et gaines	4

### 5.1.3. La réglementation relative aux déchets amiantés

La dangerosité de l'amiante a été identifiée au début du XX<sup>ème</sup> siècle, mais les mesures pour la protection des travailleurs, de l'environnement et de la population en général sont récentes. L'amiante a été reconnu comme maladie professionnelle dès 1945<sup>[222]</sup>, mais son usage n'est réglementé qu'en 1977<sup>[223]</sup>. En 1997, la France a adopté l'interdiction totale de tout usage de l'amiante (extraction, utilisation, transformation, mise sur le marché, etc.)<sup>[224]</sup>. Cette décision a été confirmée par une directive européenne en 1999<sup>[225]</sup>.

La réglementation concernant l'amiante est très fournie, elle est présente dans plusieurs textes réglementaires, tels que le code de l'environnement ou le Code du travail<sup>[226]</sup>. Seule la réglementation concernant les déchets d'amiante est présentée dans la partie ci-dessous. Avant son interdiction totale, un premier décret impose un étiquetage « amiante » aux déchets amiantés<sup>[227]</sup>. Il est ensuite suivi par plusieurs arrêtés, circulaires et décrets qui vont spécifier et encadrer les déchets amiantés sur :

- les conditions de stockage,
- les modalités de contrôle de l'empoussièrement,
- le passage de statut de déchets au statut de déchets industriels spéciaux,
- la classification des déchets d'amiante en plusieurs catégories,
- l'élimination des déchets d'amiante.

Aujourd'hui, le Tableau 97 présente la classification et la codification des déchets amiantés suite à la publication du décret 2002-540 du 18 avril 2002<sup>[228]</sup>.

Tableau 97 : La classification des déchets amiantés

CODE	DESIGNATION
06 07 01*	Déchets contenant de l'amiante provenant de l'électrolyse
06 13 04*	Déchets provenant de la transformation de l'amiante
10 13 09*	Déchets provenant de la fabrication d'amiante-ciment contenant de l'amiante
10 13 10*	Déchets provenant de la fabrication d'amiante-ciment autre que ceux visés à la rubrique 10 03 09*
15 01 11*	Emballages métalliques contenant une matrice poreuse solide dangereuse (amiante) y compris les conteneurs à pression vides
16 01 11	Patins de freins contenant de l'amiante
06 02 12*	Équipements mis au rebut contenant de l'amiante libre
17 06 01*	Matériaux d'isolation contenant de l'amiante
17 06 05*	Matériaux de construction contenant de l'amiante

La dernière grande modification de la réglementation concerne l'arrêté du 12 mars 2012 qui dicte de nouvelles règles de conduite sur la gestion des déchets d'amiante (principalement d'amiante-ciment) dans les centres de stockage<sup>[229]</sup>. Depuis le 1<sup>er</sup> juillet de la même année, les déchets d'amiante-ciment et plus largement les déchets d'amiante lié à des matériaux inertes et intègres, ne sont plus acceptés dans les Installations de Stockage de Déchets Inertes (ISDI), mais doivent être orientés vers les filières ISDND ou ISDD. En revanche, les déchets

amiantés doivent obligatoirement toujours être protégés par une enveloppe étanche, avoir un étiquetage adéquat et être suivis par le BDSA.

Les déchets d’amiante friable et libre sont les déchets les plus dangereux pour l’environnement et la santé humaine. Ces déchets doivent donc être protégés par une double enveloppe étanche. Contrairement à l’amiante lié, le producteur de déchets doit, non seulement établir un bordereau de suivi de déchet, mais aussi, obtenir un accord préalable de l’éliminateur pour la prise en charge des déchets. De plus le transport est soumis aux règles des déchets dangereux (conformité et équipement des véhicules, signalisation, formation du personnel, etc.). Les filières d’élimination de ces déchets sont les installations de stockage de déchets dangereux ou la vitrification (torches à plasma).

En résumé, dans les deux cas, le conditionnement de l’amiante est soumis à des règles strictes provenant du code de l’environnement. Les déchets amiantés doivent être contenus dans des emballages appropriés et étiquetés afin d’éviter toute émission de fibres d’amiante pendant leur manutention, transport, stockage ou inertage. L’Annexe 5.1 précise les différentes modalités.

#### 5.1.4. Les filières de gestion des déchets amiantés

Depuis plusieurs années, nombreux sont les entreprises et les chercheurs qui tentent de traiter les déchets amiantés dans l’objectif de les valoriser. Cependant, il convient en premier lieu d’enlever la dangerosité du déchet amianté et les risques qu’il fait courir à l’environnement et sur la santé humaine. Il existe plusieurs projets qui cherchent à neutraliser les effets dangereux par un traitement hydrothermal (Projet Valmiant par exemple)<sup>[219]</sup>.

A ce jour, il n’existe que trois voies « pérennes » de gestion possibles et reconnues par la réglementation : l’inertage (par vitrification) et le stockage en installations de stockage de déchets dangereux ou non dangereux. Toutefois, le choix peut se réduire à deux voies possibles suivant la catégorie de déchets amiantés (Figure 48).

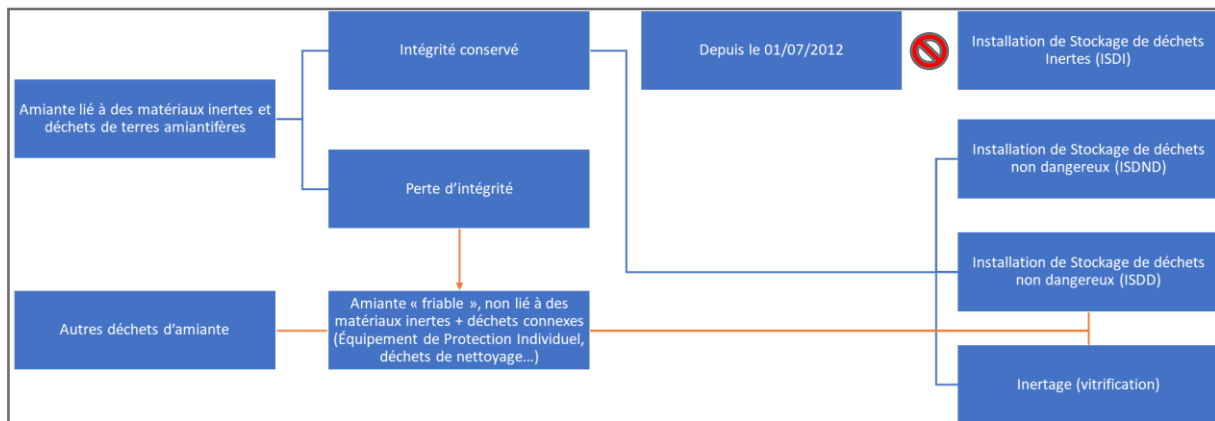


Figure 48 : L’élimination des déchets amiantés

L’élimination des déchets d’amiante liés à des matériaux inertes ayant conservé leur intégrité est interdite en installation de stockage de déchets inertes (ISDI). Ces déchets doivent donc être éliminés dans des alvéoles de stockage spécifiques dans des installations de stockage de déchets dangereux (ISDD) ou non dangereux (ISDND). Depuis le 15 février 2016, les déchets générés par une activité de construction, rénovation ou déconstruction d’un bâtiment ou par une activité de construction, rénovation ou de déconstruction de travaux de génie civil peuvent être éliminés en installation de stockage de déchets non dangereux (casiers monodéchets dédiés) à la condition qu’ils ne contiennent pas d’autres substances dangereuses que l’amiante. Dans tous les cas, ces déchets peuvent être valorisés en installation de vitrification (inertage).

Les déchets d'amiante libre (produits issus du flocage, du calorifugeage ainsi que les déchets issus du nettoyage de chantiers de désamiantage : poussières collectées par aspiration, boues, filtres de système de ventilation, bâches, chiffons, équipements de sécurité...) ne peuvent être orientés que vers une installation de stockage de déchets dangereux (ISDD) ou vers une unité de vitrification.

Les parties ci-dessous présentent les grands principes de fonctionnement des filières de gestion des déchets amiantés.

### 5.1.5. La valorisation : INERTAM (inertage par vitrification)

INERTAM est une filiale du groupe Europlasma, situé à Morcenx dans les Landes (40). L'entreprise est spécialisée dans la destruction définitive des déchets d'amiante. Son procédé, unique en France, permet de vitrifier jusqu'à cinquante tonnes par jour de déchets amiantés, via un procédé par torches à plasma.

Sur le plan juridique et réglementaire, INERTAM est la seule Installation Classée pour la Protection de l'Environnement (ICPE) autorisée, en France, à vitrifier 8 000 tonnes de déchets amiantés par an. Cette technique lui permet de garantir aux producteurs et détenteurs de déchets amiantés une destruction des effets nocifs de l'amiante et de libérer le producteur et détenteur du déchet amianté de sa responsabilité.

Au-delà de la destruction définitive de l'amiante, INERTAM, délivre un certificat de destruction définitive du déchet, ce qui libère le client (producteur et détenteur) de toute responsabilité vis-à-vis des déchets traités par INERTAM (arrêté d'exploitation n° 2003/139 du 14 avril 2013 suivi de l'arrêté du 19 mai 2007).

#### Le procédé de vitrification au plasma

Le procédé de vitrification est décomposé en 4 grandes étapes (Figure 49).

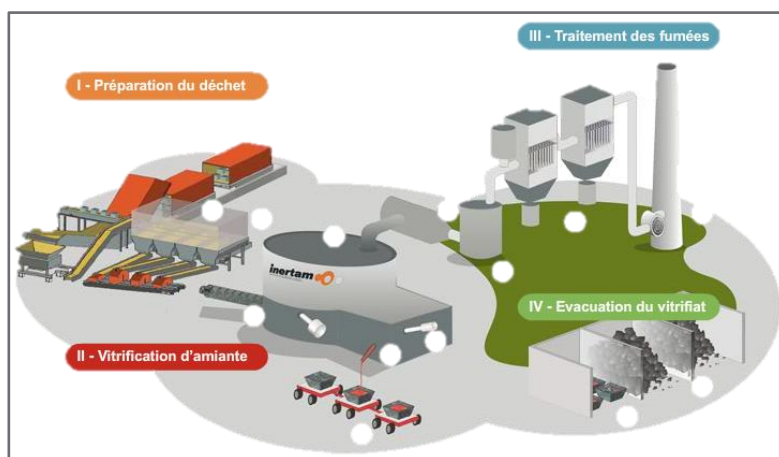


Figure 49 : Le procédé de vitrification au plasma

#### La préparation du déchet

Les déchets arrivent tous par voie routière. Après un contrôle de non-radioactivité et une pesée, les déchets amiantés conditionnés principalement en « Big-Bags » sont déchargés puis entreposés par catégorie de fusibilité (capacité à fondre) dans des containers. C'est l'opérateur en charge qui contrôle visuellement le chargement de Big-Bags et qui trie les colis en fonction de leur contenu dans les quatre grandes familles définies par INERTAM :

- les déchets contenant de la silice (flocages, gravats...),
- les déchets contenant du calcium (fibrociment...),
- les déchets combustibles (bois, EPI, bitume, polyanes, dalles de vinyle...),
- les déchets plâtreux.

### La vitrification du déchet amianté

Après avoir été contrôlés, triés et broyés, les déchets injectés dans le four sont chauffés à l'aide de trois torches à plasma : deux torches de 2 MW et une de 500 KW<sup>[230]</sup>. Le four est construit en matériaux réfractaires pour pouvoir résister aux hautes températures (avoisinant les 2500 °C). À cette température, les fibres d'amiante sont alors totalement détruites. En sortie de four, la troisième torche de 500 kW renvoie les matériaux qui ne sont pas tout à fait en fusion au cœur du four.

### Traitement des fumées

Une grande partie de l'installation concerne le traitement des fumées. Tout d'abord, une chambre post combustion permet de brûler les gaz en deux secondes à une température de 1200 °C. Les gaz restants sont ensuite refroidis par de l'air et de l'eau pour atteindre la température de 200 °C avant de suivre un traitement à la soude. Les fumées, contenant principalement des acides de soufre et de chlore, sont traitées grâce à des filtres à manches et de la chaux. Le gâteau est considéré, après réaction, comme REFIDI et part ensuite en ISDD. La quantité de déchets « ultimes » totale représente dix pour cent des déchets de départ (ratio semblable à celui de l'incinération d'ordures ménagères).

### Sorti de four et vitrifiat

Le produit fondu est extrait du four par un système de coulée en semi-continu (toutes les 1 h 30 à 2 heures). La coulée de matière (environ 1400 °C) est stockée en lingotière. Les déchets d'amiante portés à fusion fournissent en sortie du four un matériau inerte (arrêté préfectoral n° 2001/44 du 09 avril 2001) et valorisable (semblable à du basalte). Ce matériau, vitrifiat (appelé COFALIT par INERTAM), sera concassé (à une granulométrie de 0/80 mm) en vue d'une valorisation dans les travaux de BTP (remblais en sous-couche routière principalement).

### 5.1.6. L'élimination : Installations de stockage de déchets (ISDND)

Les Installations de Stockage de Déchets Non Dangereux (ISDND) sont des installations d'élimination de déchets dits ultimes. En effet, cette filière est à utiliser en dernier recours, elle ne doit traiter que les déchets ne pouvant plus faire l'objet d'une valorisation (matière ou énergétique) dans des conditions technologiques et économiques réalisables<sup>[231]</sup>. Ces installations répondent principalement à l'arrêté ministériel du 9 septembre 1997 sur le stockage des déchets non dangereux et au code de l'environnement.

Sur le plan juridique et réglementaire, ce sont des installations qui sont soumises à autorisation (ICPE) destinée à accueillir des déchets non dangereux au sens de l'article R.541-8 du code de l'environnement<sup>[232]</sup>. Avant d'être admis dans cette filière, les déchets sont soumis à une procédure d'admission préalable. Elle consiste à déterminer les caractéristiques de base du déchet et les vérifier avec les critères d'admissibilité dans la filière. En effet, les déchets admis dans cette filière sont des déchets considérés comme Non dangereux et les déchets d'amiante lié à des matériaux inertes. Le *Tableau 98* ci-dessous regroupe les déchets interdits dans cette filière.

Tableau 98 : Les déchets interdits en ISDND

Les déchets dangereux au sens du code de l'environnement	Les déchets d'activités de soins et assimilés à risque infectieux
Les substances chimiques non identifiées et nouvelles	Les déchets radioactifs
Les déchets contenant plus de 50 mg/kg de PCB	Les déchets d'emballage (décret n° 94-609 du 13 juillet 1994)
Les déchets qui mis en décharge seraient explosifs, corrosifs, comburants, facilement inflammables	Les déchets dangereux des ménages collectés séparément
Les déchets liquides	Et, les des pneumatiques usagés

### 5.1.7. L'élimination : Installations de stockage de déchets (ISDD)

Les Installations de Stockage de Déchets Dangereux (ISDD) sont également des installations d'élimination de déchets dits ultimes. De la même manière que la précédente filière (ISDND), les ISDD sont des installations qui sont soumises à autorisation (ICPE) destinées à accueillir des déchets dangereux.

Selon la réglementation l'installation est divisée en casiers indépendants de mille mètres carrés maximum et seuls deux casiers (divisés eux-mêmes en alvéoles) peuvent être exploités simultanément.

L'exploitation des deux types installation d'élimination est soumise à un certain nombre de règles communes.

La liste des installations est présentée en *Annexe 5.2*, *Annexe 5.3* et *Annexe 5.4*.

#### La procédure d'admission

Avant l'admission du déchet dans le centre de stockage, l'exploitant demande une information sur la nature du déchet avec une caractérisation de base.

#### Contrôle à la réception du déchet

A la livraison du déchet, une procédure de contrôle vérifie la concordance des informations fournies préalablement, la validité du certificat d'acceptation préalable et vérifie que le flux du chargement est non-radioactif.

#### La mise en alvéole

La mise en alvéole se fait de manière à ne pas déranger la stabilité des déchets et des structures encadrantes.



Figure 50 : La couverture des déchets amiantés en alvéole

Les déchets sont donc stockés de manière successive dans les casiers et recouverts régulièrement (*Figure 50*) pour limiter les envols et les nuisances olfactives le cas échéant (les déchets amiantés ne sont pas concernés par les nuisances olfactives). Les déchets amiantés disposent de leurs propres casiers et ne sont pas mélangés avec d'autres déchets.

De plus, ils sont stockés avec leur conditionnement afin d'éviter que le personnel ne subisse une exposition directe. En outre, les palettes, enrobages, films plastiques, Big-Bags sont acceptés tel quel dans les alvéoles.

### 5.1.8. L'enjeu des déchets amiantés pour EDF

En 2015, le groupe EDF a généré plus de 2 500 tonnes de déchets potentiellement amiantés selon la répartition ci-dessous (*Figure 51*).



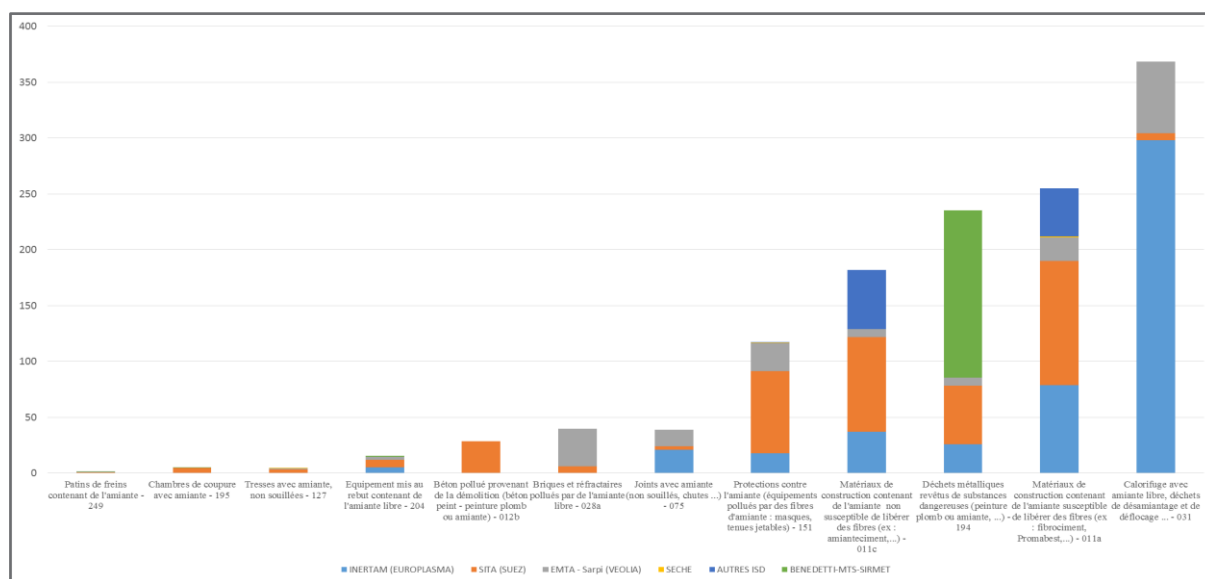


Figure 51 : Le type de déchets amiantés produit par EDF en 2015

Les quatre premières catégories se partagent la grande majorité des tonnages qui ont été gérés, en 2015 :

- les déchets calorifuges et flocages amiantés (code 031) représentent environ 370 tonnes,
- les matériaux de construction contenant de l'amiante susceptible de libérer des fibres (code 011a) totalisent 255 tonnes,
- les matériaux de construction contenant de l'amiante non susceptible de libérer des fibres (code 011c) représentent 182 tonnes,
- les Équipements de Protection individuel (EPI) pollués par des fibres d'amiante comptabilisent 117 tonnes.

Un autre type de déchets qui représente un très gros tonnage est celui des déchets métalliques revêtus de substances dangereuses — peinture plomb ou amiante — (code 194), mais il est difficile de le compter dans les déchets amiantés à proprement dit, car il désigne également d'autres déchets qui ne contiennent pas d'amiante (le plomb par exemple).

La Figure 52 nous montre les quantités envoyées dans chaque filière, au total, en 2015 :

- 37,5 % du tonnage a été valorisé par vitrification (Code R5 représenté en bleu),
- 50,8 % du tonnage a été éliminé en installation de stockage de déchet (dangereux ou non dangereux), représenté en gris (code D5),
- 11,7 % à fait l'objet d'un désamiantage.

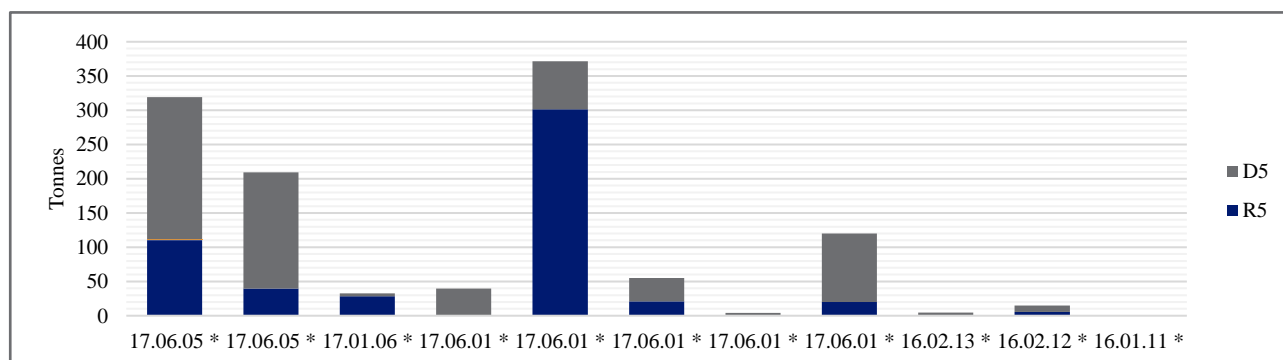


Figure 52 : La répartition des déchets amiantés dans les filières.



Les 11,7 % de déchets amiantés envoyés en désamiantage (BENEDETTI-MTS-SIRMET) représentent au total 150 tonnes. Une fois l’amiante séparé du matériau support, on ne comptabilise plus que 2 à 4 % en masse, par rapport à la masse initiale, de déchets contenant de l’amiante (EPI et filtres compris). Il est alors question de ne traiter que de 3 à 6 tonnes de déchets amiantés qui sont, soit envoyés en installation de stockage, soit en vitrification selon la décision du site producteur des déchets initiaux d’EDF. Cela paraît négligeable face aux tonnages globaux de déchets amiantés.

Il est intéressant de noter que les sites envoyant leurs déchets à la vitrification (INERTAM) ne sont pas nécessairement les plus proches (*Figure 53*).

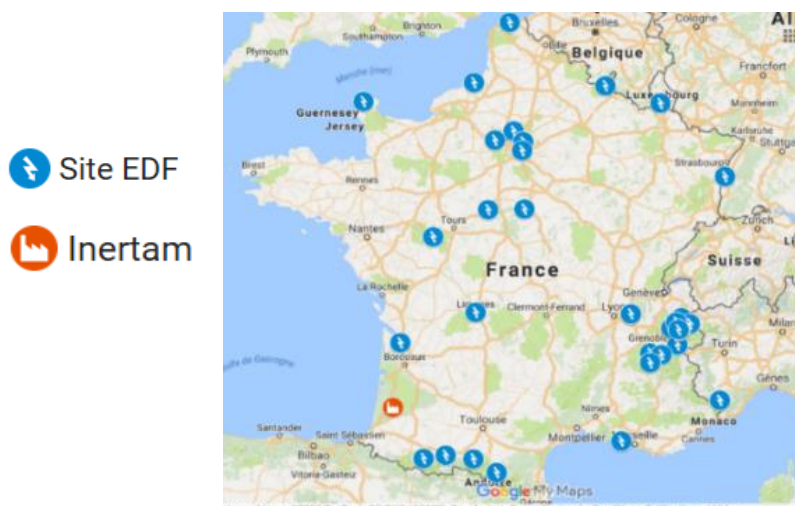


Figure 53 : Les sites EDF envoyant leurs déchets amiantés chez INERTAM

## 5.2. ÉTUDE DE CAS : COMPARAISON DES DEUX INSTALLATIONS

Dans un premier temps, nous allons chercher à comparer deux installations de gestion de déchets amiantés. En 2015, le Centre de Production Thermique (CPT) de Porcheville a pris la décision d’envoyer à plusieurs reprises le déchet ci-dessous en vitrification (*Tableau 99*).

Tableau 99 : Le déchet amianté envoyé par le CPT de Porcheville

CODE EUROPEEN DECHET	LIBELLE DECHET	QUANTITE TOTALE 2015	CODE FILIERE RETENUE	TYPE
17 06 01*	Calorifuge avec amiante libre, déchets de désamiantage et de déflocage... – 031	8,94	R5	Valorisation

Pour valoriser ses déchets amiantés, le CPT de Porcheville a le choix entre l’installation de valorisation, située dans le département des Landes (40), soit à plus de 730 kilomètres et une installation de stockage de déchets dangereux, située à moins de 7 kilomètres. Dans les parties suivantes, il s’agit de tester notre modèle, en comparant les installations citées précédemment, pour 8,94 tonnes de déchets amiantés de type « Calorifuge avec amiante libre, déchets de désamiantage et de déflocage » (17 06 01\*). Les deux installations seront notées A et B et les résultats sont présentés par dimension.

**Remarque :** l’étude de cas sur les déchets amiantés est cas test et d’ajustement. Des analyses complètes ont été effectuées, mais pour des raisons de confidentialité, elles ne sont pas toutes détaillées dans ce manuscrit.

### 5.2.1. Dimension réglementaire

Pour rappel, la dimension réglementaire est composée des quatre critères (et de leur échelle) ci-dessous (Figure 54) :

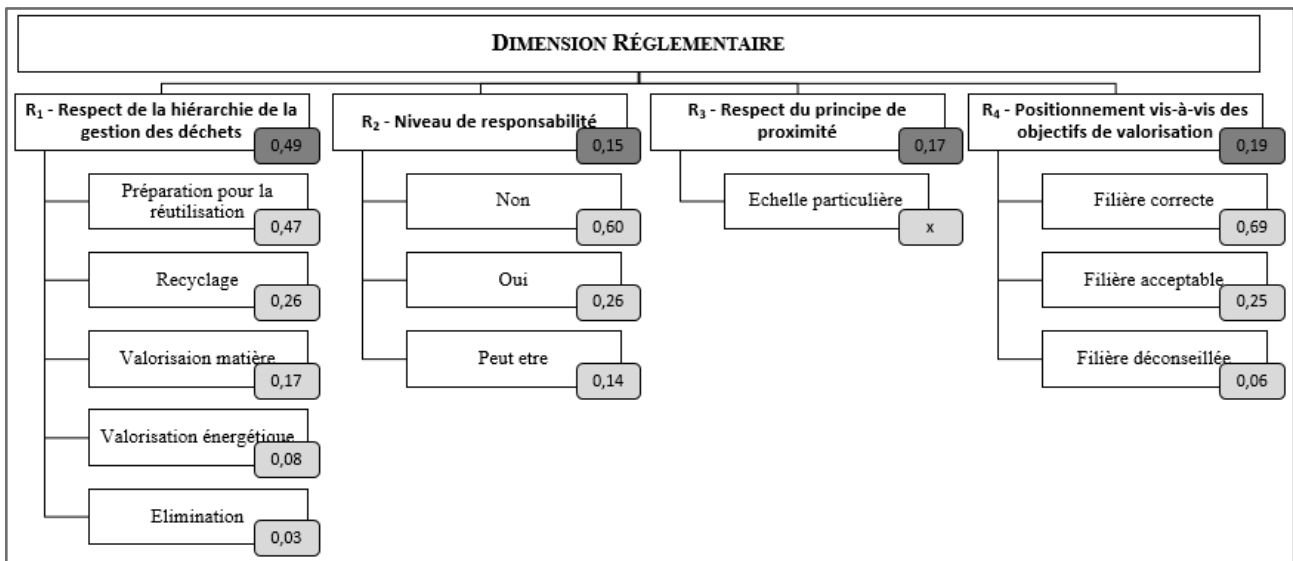


Figure 54 : Critères de la dimension réglementaire

#### 5.2.1.1. Critère R<sub>1</sub> – Respect de la hiérarchie de la gestion des déchets

L’installation de stockage de déchet (A) se positionne comme une installation d’élimination alors que, l’installation (B) est identifiée comme une installation de valorisation matière. Les deux installations obtiennent alors les scores ci-dessous (Tableau 100) sur le premier critère de la dimension réglementaire.

Tableau 100 : Les scores des installations sur le critère R<sub>1</sub>

INSTALLATIONS	NIVEAU	NOTES	SCORE
Installation A	Élimination	0,03	0,014 7
Installation B	Valorisation Matière	0,17	0,083 3

**Remarque :** L’évaluation des installations de gestion de déchets amiantés n’a pas apporté de réflexion particulière. En revanche, la distinction entre le niveau « valorisation matière » et le niveau « recyclage » a été appréciée par les experts de confrontation puisque cela permet de mettre en avant la notion de *downcycling*.

#### 5.2.1.2. Critère R<sub>2</sub> – Niveau de responsabilité

Ce critère permet de comparer les installations sur une échelle de responsabilités (Tableau 101). L’installation A n’élimine pas définitivement les effets nocifs possibles des fibres d’amiante, à la différence de l’installation B qui utilise un procédé de vitrification. Néanmoins, on peut émettre l’hypothèse que ces déchets sont stabilisés. En effet, ces derniers sont scellés hermétiquement dans des big-bags et stockés dans une alvéole dédiée aux déchets amiantés. Les scores des installations A et B pour ce critère sont les suivants :

Tableau 101 : Les scores des deux installations sur le critère R<sub>2</sub>

INSTALLATIONS	NIVEAU	NOTES	SCORE
Installation A	Oui	0,26	0,039
Installation B	Non	0,60	0,090

En l’état, cette notion de responsabilité est sujette à discussion et il conviendra de confirmer les résultats par une analyse de sensibilité.

**Remarque :** Les trois niveaux de l'échelle ont fait de nombreux débats avec les experts de construction et de confrontation et plus particulièrement le niveau « peut-être ». En effet, il est difficile de concevoir qu'il existe aujourd'hui un « flou » par rapport à cette notion dans certains contextes particuliers. De plus, lors de la construction de l'échelle du critère, nous nous sommes d'abord interrogés sur le moment où la responsabilité est enlevée ou non (en entrée d'installation, au cours du processus de traitement, en fin d'installation, etc.)

### 5.2.1.3. Critère R<sub>3</sub> – Respect du principe de proximité


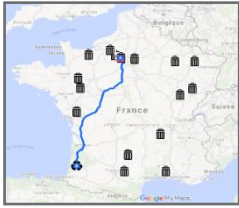
Ce critère permet de comparer les installations en fonction de leur éloignement par rapport à la localisation du producteur de déchets. Pour cela, l'échelle de cotation (*Tableau 102*) permet d'identifier un indice qui est ensuite utilisé dans une matrice de comparaison.

*Tableau 102 : L'échelle du critère R<sub>3</sub> Respect du principe de proximité*

RESULTAT DE LA COMPARAISON (EN KM)	DIFFERENCE DE								
	0 — 50	200	300	400	500	600	700	800	900
Échelle de Saaty :	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Dans notre cas d'étude, l'installation A est située à 6,8 kilomètres du CPT de Porcheville alors que l'installation B se situe à 734 kilomètres. Ces données résumées dans le *Tableau 103* identifient l'indice à utiliser à savoir 7,31.

*Tableau 103 : Les données pour le critère R<sub>3</sub>*

INSTALLATION A	INSTALLATION B
Distance entre Porcheville et l'installation A : 6,8 km	Distance entre Porcheville et l'installation B : 734 km
	
Niveau (différence) : Différence 727 km et Indice de l'échelle de Saaty correspondant : 7,31	

Cet indice est ensuite utilisé dans une matrice de comparaison (cf. *Chapitre 3*), afin d'obtenir les notes, puis les scores des deux installations (*Tableau 104*).

*Tableau 104 : Les scores des deux installations sur le critère R<sub>3</sub>*

	INSTALLATION A	INSTALLATION B
Distance entre Porcheville et le site de gestion	6,8 km	734 km
Note	0,89	0,11
Score	0,151 3	0,018 7

**Remarque :** La construction du critère et l'échelle associée a fait l'objet de nombreux débats lors des réunions avec les experts de construction. Les échanges ont porté sur le type de critère (qualitatif ou quantitatif), sur le type d'échelle de critère à utiliser (ordonnée, intervalle ou ratio) ainsi que sur la cotation des éléments de l'échelle. Le choix a été fait lors d'une réunion avec les experts de construction de garder un critère quantitatif avec échelle de type ratio, mais avec un seuil d'indifférence entre 0 et 50 kilomètres. De plus, nous avons décidé de ne pas interroger les experts de cotation pour évaluer les éléments composant l'échelle du critère.

#### 5.2.1.4. Critère R<sub>4</sub> – Positionnement vis-à-vis des objectifs de valorisation

Le critère R<sub>4</sub> permet de comparer les filières par rapport à leur capacité à répondre aux objectifs globaux de valorisation d'EDF. En 2015, le référentiel déchet d'EDF précise que le déchet amianté, noté 17 06 01\*, n'est pas comptabilisé dans les objectifs de valorisation des déchets valorisables (liste verte). De plus, les filières A et B sont alors toutes les deux identifiées comme une gestion correcte. Nous avons vérifié cette hypothèse pour les années 2016 et 2017. Le *Tableau 105* précise le score des deux installations comparées.

Tableau 105 : Les scores des deux installations sur le critère R<sub>4</sub>

INSTALLATIONS	NIVEAU	NOTES	POIDS	SCORE
Installation A	La filière est correcte	0,69	0,19	0,13
Installation B	La filière est correcte	0,69	0,19	0,13

#### 5.2.1.5. Résultats de la comparaison sur la dimension réglementaire

Le *Tableau 106* ci-dessous regroupe l'ensemble des notes, des poids et des scores de la dimension réglementaire pour les deux installations comparées. À la lecture, on remarque que les deux installations ont la même note globale.

Tableau 106 : La synthèse des résultats sur la dimension réglementaire

INSTALLATIONS	NIVEAU	NOTES	POIDS	SCORE
<b>CRITERE R<sub>1</sub> — RESPECT DE LA HIERARCHIE DE GESTION DES DECHETS</b>				
Installation A	Élimination	0,03	0,49	0,014 7
Installation B	Valorisation Matière	0,17		0,083 3
<b>CRITERE R<sub>2</sub> — NIVEAU DE RESPONSABILITE</b>				
Installation A	Oui	0,26	0,15	0,039
Installation B	Non	0,60		0,090
<b>CRITERE R<sub>3</sub> — PRINCIPE DE PROXIMITE</b>				
Installation A	6,8 km	0,89	0,17	0,151 3
Installation B	734 km	0,11		0,018 7
<b>CRITERE R<sub>4</sub> — POSITIONNEMENT VIS-A-VIS DES OBJECTIFS DE VALORISATION</b>				
Installation A	La filière est correcte	0,69	0,19	0,13
Installation B	La filière est correcte	0,69		0,13
<b>NOTE GLOBALE DE LA DIMENSION</b>				
Installation A	0,014 7 + 0,039 + 0,151 3 + 0,13		<b>0,335</b>	
Installation B	0,0833 + 0,090 + 0,018 7 + 0,13		<b>0,322</b>	

Cependant, certaines hypothèses choisies méritent d'être vérifiées. En effet, pour le critère *R<sub>2</sub> — niveau de responsabilité*, nous avons fait le choix de dire que l'ISDD ne permettait pas de retirer la responsabilité du producteur de déchets. Les analyses de sensibilité vont permettre de visualiser l'influence de ce critère (en fonction du niveau choisi) sur les résultats globaux de la dimension. De plus, pour le critère *R<sub>4</sub> - Positionnement vis-à-vis des objectifs de valorisation* nous avons retenu que les deux filières étaient considérées comme « gestion correcte ». Or, les objectifs du plan national de gestion des déchets sont de réduire de 30 % d'ici 2020 la quantité mise en installation de stockage et de les diviser par deux d'ici 2025.

#### 5.2.1.6. Analyse de sensibilité des résultats sur la dimension réglementaire

Les deux premiers histogrammes de la *Figure 55* représentent le cas de base présenté dans les parties ci-dessus. Cette représentation en histogramme empilé permet de visualiser l'importance des scores des installations sur chacun des critères. Par exemple, on voit très clairement que les scores obtenus par l'installation B sur les critères R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub> et R<sub>3</sub> n'ont pas la même importance sur la note globale que les scores obtenus par l'installation A. En outre, le score obtenu par l'installation B sur le critère R<sub>1</sub> représente près de 25 % de sa note globale et moins de 10 % pour le score obtenu sur le critère R<sub>3</sub> alors que, inversement, le score du critère R<sub>1</sub> de

l'installation A représente moins de 5 %, mais il représente plus de 40 % de sa note globale pour le critère R<sub>3</sub>. Quant au critère R<sub>4</sub>, il pèse pour 40 % de la note des deux installations. De manière générale, il est difficile d'identifier la meilleure des deux installations pour ce cas de figure.

En revanche, les différences entre les deux installations sur les autres histogrammes sont plus marquées. En

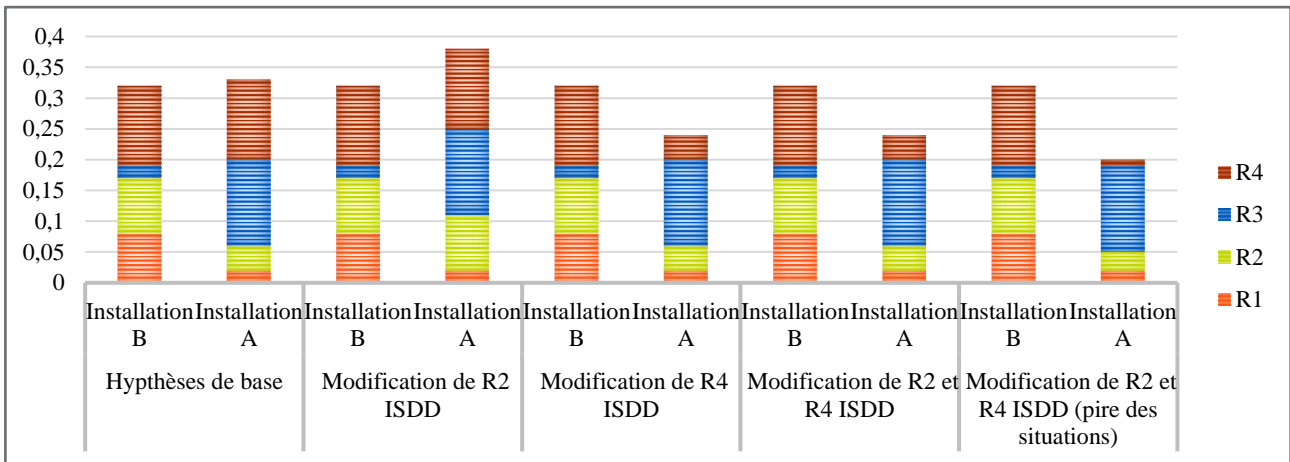


Figure 55 : La synthèse des résultats des analyses de sensibilité sur la dimension réglementaire

effet, le second couple d'histogrammes montre qu'une modification de niveau du critère R<sub>2</sub> en faveur de l'installation A avantage nettement cette installation. Ainsi, en prenant l'hypothèse qu'il existe une perte de la responsabilité en envoyant les déchets vers l'installation A, la note globale de l'installation monte à 0,38 soit 16 % de plus que la note globale de l'installation B. Les trois autres analyses de sensibilité montrent, au contraire, un net avantage pour l'installation B bien que sa note globale n'évolue pas. L'écart se creuse via un abaissement, plus ou moins important, de la note globale de l'installation A en fonction des hypothèses choisies.

En conclusion, le résultat de la comparaison des deux installations sur la dimension réglementaire dépend essentiellement du positionnement de l'installation de stockage sur les critères R<sub>2</sub> et R<sub>4</sub>. En effet, la position de l'installation B sur les échelles des critères de la dimension réglementaire est stable.

### 5.2.2. Dimension économique

Pour rappel, la dimension économique est composée des trois critères (Figure 56) :

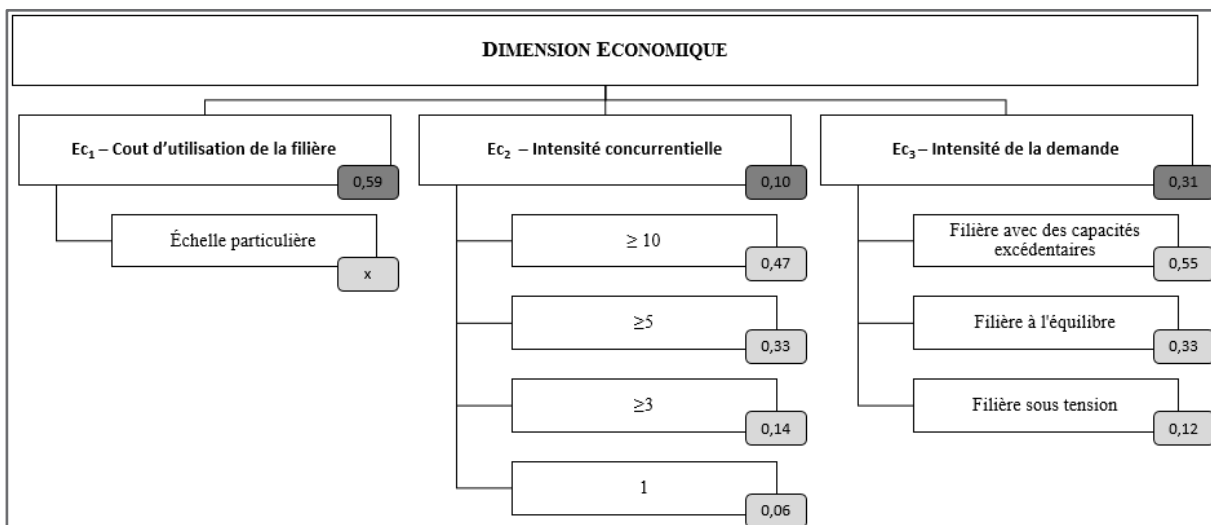


Figure 56 : Les critères de la dimension économique

5.2.2.1. Critère  $Ec_1$  – Le coût d'utilisation de l'installation

Ce critère a pour objectif de comparer les installations de gestion envisagées par rapport à leur coût final, c'est-à-dire le prix à la charge d'EDF (transport compris). Une étude réalisée par EDF a permis d'obtenir différents coûts de transport et de gestion pour des déchets amiantés (*Tableau 107*). Cette étude met en avant et teste quatre méthodologies d'obtention et d'estimation des coûts (internes à l'entreprise) pour la gestion de ses déchets industriels.

Tableau 107 : Un extrait de la base de données pour le cas d'étude

PARTIE 1 : TRANSPORTS						
DISTANCE	DEPARTEMENT D'ORIGINE	ÉQUIPEMENT	ADR	TITULAIRE CONTRAT	COÛTS*	COÛTS*(APRES REVISION)
6,8	Yvelines	Simple plateau	Non	EMTA (VEOLIA)	$C_{T1}$	$C_{T1r}$
6,8	Yvelines	Simple plateau	Oui	EMTA (VEOLIA)	$C_{T2}$	$C_{T2r}$
6,8	Yvelines	Benne vrac	Non	EMTA (VEOLIA)	$C_{T3}$	$C_{T3r}$
6,8	Yvelines	Benne vrac	Oui	EMTA (VEOLIA)	$C_{T4}$	$C_{T4r}$
734	Yvelines	Simple plateau	Oui	INERTAM	$C_{T5}$	$C_{T5r}$
Partie 2 : Processus de traitement						
Code	Libellé	Type	Titulaire	Coûts*	TGAP	
17 06 01*	Calorifuges avec amiante libre, déchets de désamiantage et de déflocage...	ISDD	SITA	$C_{p1}$	22,07	
		ISDD	SECHE	$C_{p2}$		
		ISDD	ETMA	$C_{p3}$		
		Inertage	INERTAM	$C_{p4} - C_{p5}$	0	
Autres informations						
Les coûts de transport sont exprimés en coût par transport. La date pour la formule de révision est décembre 2015. Les coûts pour la phase de traitement sont exprimés en euros par tonne.						

\* Pour des raisons de confidentialité, le détail des coûts n'est pas développé.

Dans notre cas, il s'agit de comparer les installations à partir des données issues du *Tableau 107* et de l'échelle ci-dessous :

 Tableau 108 : L'échelle du critère  $EC_1$ 

RESULTATS DE LA COMPARAISON	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %	90 %	$\geq 100$ %
Notes de l'élément	1,32	2,05	3,37	4,13	5,34	6,15	6,90	8,17	8,56	9

Pour obtenir les résultats de la figure, nous avons retenu le coût de  $C_{T2r}$  euros dédiés au transport des déchets du CTP de Porcheville à l'installation A. En effet, dans notre cas, nous ne répondons pas au cahier des charges pour l'obtention d'une dérogation partielle de l'ADR.

Ensuite, l'exploitant de l'installation A est ETMA ainsi, nous considérons un coût de  $C_{p3}$  euros par tonne pour le processus de traitement auquel il faut rajouter les 22,07 euros par tonne de déchet de TGAP. L'installation B a un coût de transport de  $C_{T5r}$  euros et un coût compris entre  $C_{p4}$  et  $C_{p5}$  euros par tonne pour le traitement soit un coût total de  $C_{BTotal-1}$  euros pour la fourchette basse et  $C_{BTotal-2}$  euros pour la fourchette haute. Cette incertitude, d'environ 51 %, dépend essentiellement des caractéristiques intrinsèques du déchet. Le coût total d'utilisation de l'installation de stockage de déchet dangereux est de  $C_{ATotal-1}$  euros. Pour des raisons de confidentialité, le critère  $Ec_1$  - Le coût d'utilisation de la filière n'est pas développé davantage dans le cadre ce manuscrit.



**Remarque :** La construction du critère et l'échelle associée a fait l'objet de nombreux débats avec les experts de construction. En effet, les experts de construction ont remarqué qu'il est difficile de concevoir qu'une installation peut être jugée comme deux fois meilleure qu'une autre quand les valeurs numériques comparées sont très proches (exemple ci-dessous).

Une note  $i5$  résultante de la comparaison entre deux voitures A et B (coût respectif de 500 € et de 1 000 €) est équivalente à une note  $i5$  résultante d'une comparaison entre deux voitures C et D où les coûts respectifs sont 1 € et 2 €. Les deux comparaisons (A/B) et (C/D) obtiennent une note  $i5$  (niveau 50 % dans les 2 cas) alors que les différences ne sont pas identiques et n'ont pas la même importance. En effet, dans le premier cas la différence semble importante à prendre en compte alors (500 €) que dans le second cas, la différence est marginale (1 €).

La conception d'une échelle permettant de lever cette problématique, nécessite d'avoir une entière connaissance des limites minimales et maximales, pour borner l'échelle de cotation. Or, il est évident que ces bornes évoluent en fonction du déchet (amiante, gravats de la déconstruction, sédiments, etc.) et de la situation géographique du producteur de déchets (distance). Nous avons donc fait le choix de garder les échelles de ratio afin de répondre au besoin d'EDF, c'est-à-dire de concevoir un outil d'aide à l'arbitrage indépendant vis-à-vis du déchet et de la situation géographique du décideur opérationnel.

#### 5.2.2.2. Critère $Ec_2$ – Intensité concurrentielle

Nous cherchons à évaluer, via ce critère, l'intensité concurrentielle du marché de la filière de gestion envisagée. L'installation B est la seule installation de valorisation des déchets amiantés par vitrification. En conséquence, son score est nul sur ce critère (*Tableau 109*). L'installation A fait partie de la filière installation de stockage de déchets dangereux (ISDD) qui compte seize installations, dont quinze sont autorisées à prendre en charge les déchets amiantés. Elle obtient le score 0,05.

*Tableau 109 : Les scores des installations sur le critère  $Ec_2$*

INSTALLATIONS	NIVEAU	NOTES	POIDS	SCORE
Installation A	$\geq 10$	0,47	0,10	0,047
Installation B	-	0		0

**Remarque :** Ce critère a apporté la notion de périmètre de l'étude. En effet, il y a eu plusieurs échanges avec les experts de construction à propos du périmètre à prendre en considération. Il s'agit soit de fixer un périmètre d'étude « France » ou « local » soit, de donner la possibilité à l'utilisateur de choisir son périmètre. Dans les 2 cas, il est important prendre le même périmètre pour tous les critères de la dimension. Il a été décidé que le périmètre idéal est celui qui permet d'intégrer l'ensemble des solutions possibles.

#### 5.2.2.3. Critère $Ec_3$ – Intensité de la demande

Le cas particulier des déchets amiantés fait que l'ensemble des capacités des installations de stockage de déchets dangereux est en « capacités excédentaires ». En effet, les arrêtés d'exploitation de ces installations ne limitent pas en tonnage, journalier ou annuel, le traitement des déchets amiantés. En revanche, l'installation B est la seule installation de traitement par vitrification. De plus, son processus industriel ne permet de traiter, dans des conditions optimales, que 4 800 tonnes annuellement<sup>[230]</sup>. En conséquence, nous considérons cette filière « à l'équilibre », mais nous analyserons la sensibilité des résultats de la partie économique en prenant l'hypothèse que cette filière peut également être considérée comme étant « sous tension ». Ces différentes possibilités d'évaluation sont résumées dans le *Tableau 110* ci-dessous :



Tableau 110 : Les scores des installations sur le critère Ec<sub>3</sub>

INSTALLATIONS	NIVEAU	NOTES	POIDS	SCORE
Installation A	Filière avec des capacités excédentaires	0,55	0,33	0,181 5
Installation B	Filière à l'équilibre	0,33		0,108 9
ANALYSES DE SENSIBILITE INERTAM				
Installation B	Filière sous tension	0,12	0,31	0,037 2

**Remarque :** Pour le périmètre, il s'agit des mêmes remarques que pour le critère précédent, l'intensité concurrentielle. De plus, à la différence du critère T<sub>5</sub> — Capacité d'absorption annuelle de l'installation, qui permet de mesurer la capacité de l'installation, il s'agit pour ce critère économique, l'intensité de la demande, de comparer l'ensemble des capacités des installations sur le périmètre choisi préalablement.

#### 5.2.2.4. Résultats de la comparaison sur la dimension économique

La Figure 57 présente les résultats pour les critères Ec<sub>2</sub> et Ec<sub>3</sub> issues de la comparaison des deux installations sur la dimension économique. On remarque, très nettement, que l'installation B obtient la note globale la plus faible. Cela s'explique à partir de l'ensemble des résultats sur chacun des critères. Il est évident que la modification de l'hypothèse sur le critère Ec<sub>3</sub> *Intensité de la demande* (analyse de sensibilité, Tableau 110) pour l'installation B accentue cette différence (histogramme de droite).

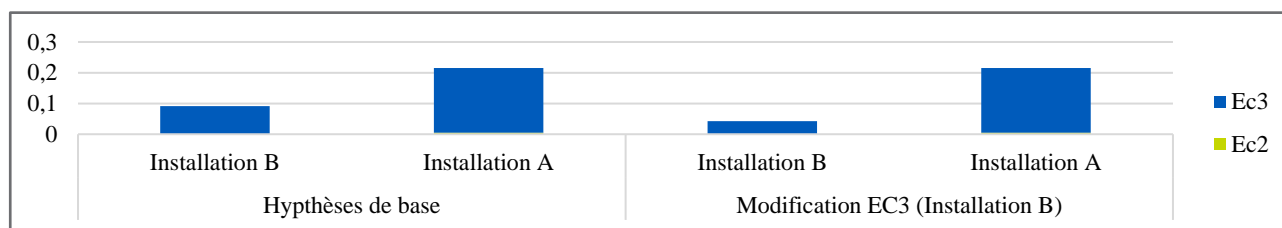


Figure 57 : La synthèse des résultats et analyses de sensibilité sur la dimension économique

A la vue de ces résultats, il est préférable, sur la (dimension économique) de traiter le déchet étudié dans l'installation de stockage de déchet dangereux. En effet l'installation B se trouve dans la plus mauvaise des situations :

- procédé coûteux,
- pas de concurrence, une seule installation,
- les capacités de la filière sont limitées ou insuffisantes.

Ces trois facteurs permettent de déterminer le rapport de force entre l'installation de traitement (installation A) et le gestionnaire de déchet (CTP de Porcheville). Le centre de production thermique de Porcheville se trouve dans une situation plus confortable par rapport à l'installation A. En effet, le CPT détient le pouvoir de négociation et a la possibilité de négocier les tarifs (déjà faibles comparés à l'installation B), car la concurrence est correcte avec plus de quinze installations sur le territoire national dont, deux en Ile-de-France et quatre à moins de cent kilomètres.

**Remarque :** Cette étude de cas a également permis d'écarter un critère : les substitutions possibles. Ce critère fait partie des 5 forces permettant de mesurer la robustesse d'un marché<sup>[169], [191]</sup>. A notre connaissance, ce critère n'a pas été utilisé dans le cadre de la gestion des déchets, mais plutôt dans le secteur Agro-Alimentaire (ex : Danone, Coca-cola) et High-Tech (ex : Archos, IBM, Microsoft). Ce critère avait pour objectif de fournir des informations les filières de substitutions possibles à la filière de gestion envisagée. Nous avons décidé de ne pas retenir ce critère puisque le nombre de filières de substitution est toujours le même, quel que soit le périmètre choisi.

### 5.2.3. Dimension territoriale

La dimension territoriale se compose de cinq critères répartis selon le schéma (Figure 58) ci-dessous :

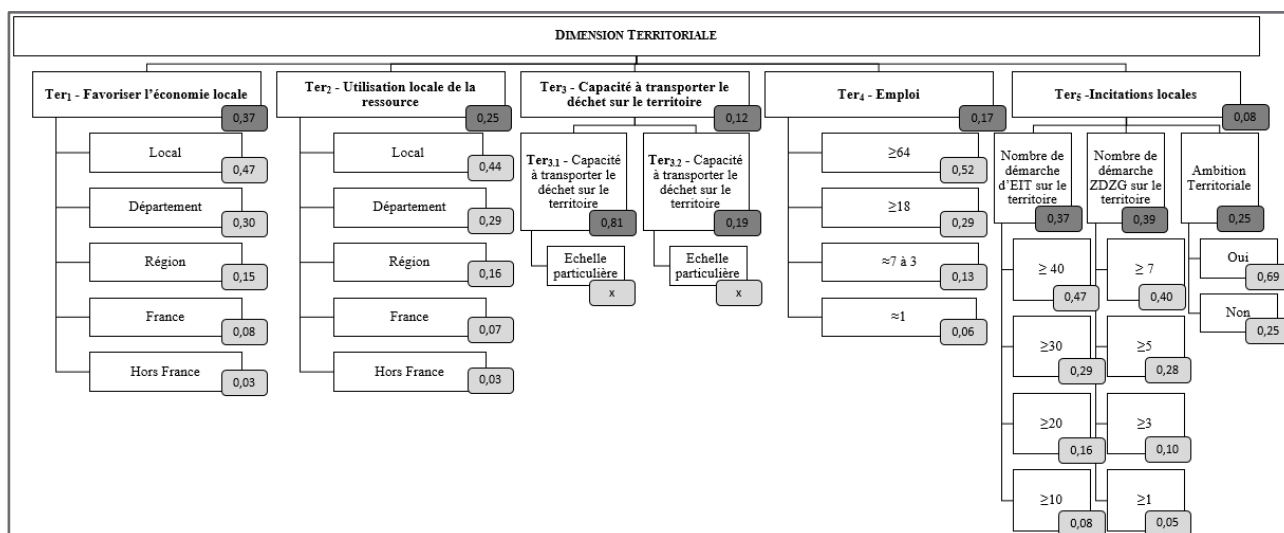


Figure 58 : Les critères de la dimension territoriale

#### 5.2.3.1. Critère Ter<sub>1</sub> – Favoriser l'économie locale

Dans le cadre des démarches de développement durable de collectivités, la valorisation des ressources et du tissu économique local est l'un des axes pour répondre aux enjeux environnementaux<sup>[196]</sup>. De plus, choisir une installation de gestion de déchet permet de contribuer à son activité économique et donc au développement économique de son territoire<sup>[201]</sup>. Le Tableau 111, ci-dessous, présente les résultats des deux installations sur ce critère.

Tableau 111 : L'échelle du critère Ter<sub>1</sub> — Favoriser l'économie locale

INSTALLATIONS	NIVEAU	NOTE	POIDS	SCORE
Installation A	Local	0,47	0,37	0,17
Installation B	France	0,08		0,03

#### 5.2.3.2. Critère Ter<sub>2</sub> – Utilisation locale de la ressource

Nous rappelons que l'objectif recherché, par le biais de ce critère, est d'évaluer l'utilité de la ressource au territoire. Pour cela, on regarde la proximité entre le lieu de production de la nouvelle ressource, issue de la valorisation du déchet et son lieu d'utilisation. Ainsi, l'installation B est la meilleure des deux solutions puisqu'elle valorise la ressource en sous-couche routière dans un périmètre très local (inférieur à cinquante kilomètres)<sup>[230]</sup>. Elle obtient le score de 0,20. En opposition, l'installation A ne permet de valorisation du déchet et n'est donc pas évaluée sur ce critère et obtient un score nul (Tableau 112).

Tableau 112 : L'échelle du critère Ter<sub>2</sub> — Favoriser l'économie locale

INSTALLATIONS	NIVEAU	NOTE	POIDS	SCORE
Installation A	-	-	0,37	0
Installation B	local			0,20

#### 5.2.3.3. Critère Ter<sub>3</sub> – Capacité à transporter le déchet sur le territoire

La capacité du territoire à transporter le déchet fait intervenir deux notions :

- les infrastructures et les moyens mis en place par le territoire en matière de transport,
- l'insertion territoriale de l'installation de gestion de déchets en matière de transport.

Celles-ci font l'objet de deux sous critères. Le *Tableau 113* résume l'échelle, le poids des critères et des sous-critères et présente les scores obtenus des deux installations comparées. Il en ressort que l'installation de stockage de déchet dangereux est mieux placée que l'installation de valorisation sur ce critère.

*Tableau 113 : Le résumé des hypothèses et des résultats de la comparaison sur les critères Ter<sub>3</sub>*

		NOTES	POIDS	SCORE
<b>TER<sub>3</sub></b>	<b>TER<sub>3</sub> — CAPACITE A TRANSPORTER LE DECHET SUR LE TERRITOIRE</b>			
	Ter <sub>3.1</sub>		0,81	
	Ter <sub>3.2</sub>		0,19	
<b>TER<sub>3.1</sub></b>	<b>TER<sub>3.1</sub> IMPORTANCE DU RESEAU DE TRANSPORT DU TERRITOIRE</b>			
	Installation A :	0,90	0,84	0,76
	Données	Cette installation se trouve sur le département des Landes (40) où la surface dédiée aux infrastructures routières représente 0,07 % du territoire.		
	Installation B :	0,10	0,84	0,08
	Données	Cette installation se trouve sur le département des Yvelines (78) où la surface dédiée aux infrastructures routières représente 0,45 % du territoire		
<b>TER<sub>3.2</sub></b>	<b>TER<sub>3.2</sub> IMPORTANCE DE LA DIVERSITE DES MOYENS DE TRANSPORT DU TERRITOIRE</b>			
	Installation A :	0,5	0,16	0,08
	Données	Cette installation se situe sur le département des Landes (40) dans la région Nouvelle Aquitaine où le transport de marchandises s'effectue principalement par route (88 %) et par voie navigable (12 %).		
	Installation B :	0,5	0,16	0,08
	Données	Cette installation se situe sur le département des Yvelines (78) en région Ile de France où le transport de marchandises s'effectue selon trois modes de transports avec la répartition suivante : Rail : 12 % Route : 81 % Voie navigable : 7 %		
Les résultats (notes et poids) géométriques de l'agrégation aval ont été normalisés afin qu'ils se situent toujours entre 0 et 1 (peu importe le type de moyenne utilisé).				

#### 5.2.3.4. Critère Ter<sub>4</sub> – Emploi

Les deux installations étudiées ont un nombre d'employés presque équivalent sur leur site. Cependant, ramenée à un ratio par rapport à la quantité de déchet traitée annuellement, l'installation B se positionne clairement comme favorite sur cet aspect (*Tableau 114*). En effet, l'entreprise de vitrification emploie quarante-cinq personnes pour quatre mille huit cents tonnes traitées<sup>[230]</sup> alors que l'ISDD emploie cinquante-sept personnes sur son site de traitement<sup>[233]</sup>, mais avec près de 350 000 tonnes de déchets traités annuellement pour les parties ISDND ET ISDD<sup>43</sup><sup>[235]</sup>.

*Tableau 114 : Les scores des deux installations sur le critère Ter<sub>4</sub> — Emploi*

INSTALLATIONS	NIVEAU	NOTES	POIDS	SCORE
Installation B	Environ 107 tonnes par personne	0,49	0,18	0,09
Installation B : $\frac{45}{4\ 800} * 10\ 000$ soit environ 94 emplois.				
Installation A	environ 5 105 tonnes par personne	0,08		0,01
Installation A : $\frac{67}{342\ 000} * 10\ 000$ soit environ 2 emplois.				

$$\text{Ratio} : \frac{\text{Nombre d'employés dans l'installation}}{\text{Quantité de déchets traités annuellement}} * 10\ 000.$$

<sup>43</sup> La capacité annuelle de l'installation EMTA est approximativement de 560 000 tonnes réparties de la façon suivante<sup>[234]</sup> :

- 220 000 tonnes annuelles pour la partie ISDND de l'installation
- 200 000 tonnes annuelles pour la partie ISDD de l'installation (augmentation de 50 000 tonnes en 2015).
- 50 000 tonnes de terres polluées.
- 40 000 tonnes de déchet « encombrants.
- 50 000 tonnes de recyclage des déchets du BTP.

Les notes sont obtenues à partir de l'échelle de notation du critère et de l'équation générale ci-avant. Cette étape de calcul détermine un ratio entre le nombre d'employés et le volume de déchets traités par l'installation et permet de positionner l'installation sur l'échelle du critère.

### 5.2.3.5. Critère Ter<sub>5</sub> – Les incitations locales

Il est difficile aujourd'hui de distinguer les deux installations sur ce critère. En effet, malgré les recherches, nous n'avons obtenu que des données sur le premier sous critère à savoir la dynamique territoriale. Le second, la sensibilité territoriale, doit être actualisé annuellement, mais à ce jour, nous ne disposons que de la base de 2014 - 2015 et elle ne fournit pas d'informations sur les territoires des deux installations. Enfin, les plans de gestion de déchets sont en cours d'étude par les régions et par conséquent ne nous permettent pas d'utiliser le troisième sous-critère.

### 5.2.3.6. Résultats sur la dimension territoriale

En résumé, c'est l'ISDD (installation A) qui est montrée comme meilleure que l'installation B sur cette dimension (Figure 59). Ce résultat s'explique principalement à partir des critères Ter<sub>1</sub> et Ter<sub>3</sub> qui représentent plus de 96 % de la note globale de l'installation A.

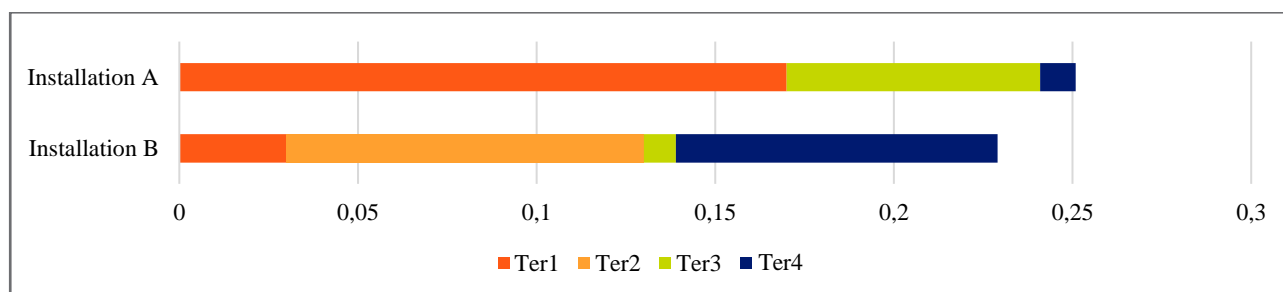


Figure 59 : La synthèse des résultats sur la dimension territoriale

## 5.2.4. Dimension environnementale

La dimension environnementale repose sur les cinq critères (Figure 60) ci-dessous :

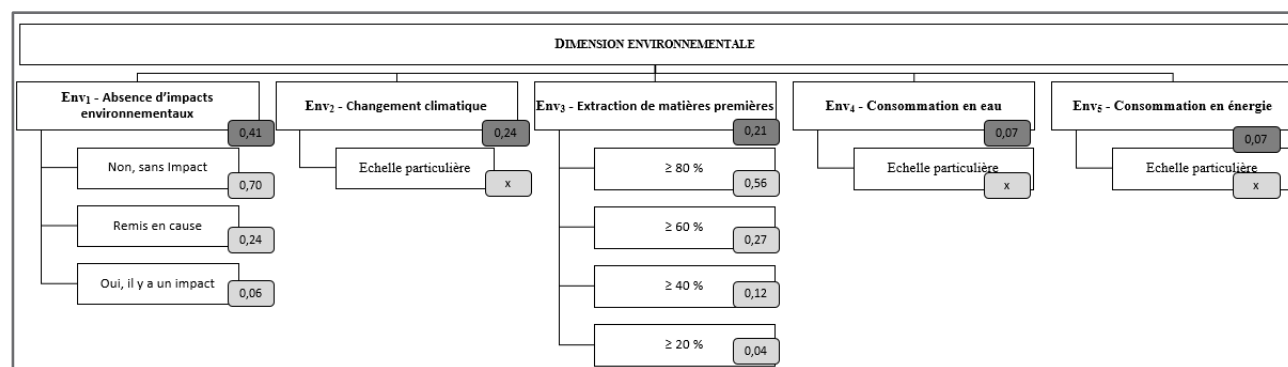


Figure 60 : Les critères de la dimension environnementale

### 5.2.4.1. Critère Env<sub>1</sub> – Les impacts environnementaux réglementés

Chaque installation de gestion des déchets est soumise à la réglementation ICPE. Les installations, qu'elles soient soumises à déclaration, enregistrement ou autorisation, doivent respecter les prescriptions qui leur sont applicables. Ces dernières sont établies par la réglementation nationale et précisées par des arrêtés préfectoraux.

Le site Inspection des Installations Classées regroupe l'ensemble des documents administratifs des installations ICPE (arrêté d'exploitation, mise en demeure)<sup>[236]</sup>. Aujourd'hui, les deux installations comparées ne sont pas

répertoriées comme des installations ne respectant pas leurs prescriptions. Elles obtiennent toutes les deux le score de 0,29 sur ce critère.

#### 5.2.4.2. Critère Env2 – Impact sur le changement climatique

Ce critère est construit sur la base d'une échelle continue. En effet, les impacts GES dépendent à la fois de l'installation choisie, du transport (distance entre le lieu de production du déchet et son lieu de valorisation ou d'élimination), mais aussi du moyen de transport utilisé. Pour utiliser ce critère, il convient d'avoir des données en fonction des hypothèses choisies. Le *Tableau 115* regroupe les hypothèses liées au transport.

*Tableau 115 : Hypothèses liées au transport*

ENV2 (TRANSPORT)	NOMBRE DE KILOMETRES	TYPE DE TRANSPORT	DONNEES	SOURCE	TOTAL
Installation A	6,8 kilomètres	Routier	0,117 kgCO2e/tonne.km Ou	[237]	9,93 kg éq. CO2
Installation B	734 kilomètres	Routier	1,46 kgCO2e/km		1071,64 kg éq. CO2

La partie « fonctionnement » de l'installation a été modélisée à partir de sources différentes. Ainsi, INERTAM a confié à BIO Intelligence Service la réalisation d'une analyse de cycle de vie sur le procédé de vitrification des déchets d'amiante. L'objectif était de quantifier les impacts environnementaux du procédé mis en œuvre sur le site de valorisation à Morcenx (40) en analysant les différentes étapes du procédé de traitement (tri, broyage, fusion par torche à plasma, concassage)<sup>[238]</sup><sup>44</sup>.

L'installation de stockage de déchets a été modélisée à partir des travaux de *Raphaël BRIÈRE*<sup>[141]</sup>. Ce dernier a contextualisé les modules ECOINVENT des installations de stockage de déchets (non dangereux, dangereux et inerte) au cas français.

*Tableau 116 : Scores des deux installations sur le critère Env2\**

ENV2 (PROCESS)	DECHARGEMENT ET TRI	FUSION	SOUS TOTAL	TRANSPORT	TOTAL	RATIO %	NOTE	SCORE
<b>Installation A</b>	822		822	1 071	-	-	-	-
ENV2 (PROCESS)	DECHARGEMENT ET TRI	RANGEMENT	SOUS TOTAL	TRANSPORT	TOTAL		NOTE	SCORE
<b>Installation B</b>	-	-	-	-	-		-	-

\* Pour des raisons de confidentialité, les informations ne sont pas développées dans ce manuscrit.

Par ailleurs, il est important de préciser que la note de l'installation B prend en compte la valorisation du vitrifiat. Celle-ci engendre des bénéfices environnementaux puisqu'ils fournissent de la matière première secondaire et évitent ainsi la production de matière première vierge. Ces bénéfices ont été modélisés pour les indicateurs Env2, Env4 et Env5. Pour prendre en compte les bénéfices de cette valorisation matière, l'inventaire de production de graviers utilisés pour les sous-couches routières a été retranché au bilan environnemental.

#### 5.2.4.3. Critère Env3 – Économie de ressources vierges

Il s'agit pour ce critère d'établir un bilan matière de l'installation de valorisation et d'en déduire la quantité évitée de matières premières vierges issue de la transformation du déchet. Il est évident que seule l'installation B peut être évaluée sur l'échelle du critère ci-dessous :

<sup>44</sup> Cette étude a été menée en conformité avec les normes de la série ISO 14040 relatives aux analyses de cycle de vie. Elle a fait l'objet d'une revue critique par un expert externe indépendant.

Tableau 117 : Les scores des installations sur le critère Env<sub>3</sub>

INSTALLATIONS	NIVEAU	NOTES	POIDS	SCORE
Installation A	-	-	0,18	0
Installation B	60 %			0,06

Cette nouvelle ressource est concassée par une entreprise sous-traitante pour atteindre une granulométrie de 0/80 mm. La vitrification permet de récupérer 60 % de la quantité en entrée du four<sup>[230]</sup>. Ainsi, l'installation B obtient le score 0,06.

#### 5.2.4.4. Critère Env<sub>4</sub> – La consommation en eau

Ce critère est un indicateur de flux. Il est exprimé en mètres cubes et est calculé en sommant les flux d'eau consommés pendant le processus de valorisation (ou d'élimination). L'analyse de cycle de vie du procédé de vitrification<sup>[238]</sup> et la modélisation de l'installation de stockage de déchet dangereux<sup>[141]</sup> précisent les consommations. Pour des raisons de confidentialité, les informations ne sont pas communiquées dans ce manuscrit.

#### 5.2.4.5. Critère Env<sub>5</sub> – La consommation en énergie

De la même façon que le critère précédent, ce critère est un indicateur de flux. Il s'agit d'examiner la consommation d'énergie non renouvelable des installations comparées. Une fois de plus, il apparaît clairement que l'installation B est énergivore. La principale source d'impact est l'électricité consommée lors de la vitrification. Les impacts proviennent principalement des consommations d'uranium pour la production d'électricité en France<sup>[238]</sup>. Pour des raisons de confidentialité, les informations ne sont pas communiquées dans ce manuscrit.

#### 5.2.4.6. Résultats sur la dimension environnementale

Pour des raisons de confidentialité, il n'y aura aucune analyse graphique de la comparaison pour cette dimension. Néanmoins, nous émettons l'hypothèse qu'il est préférable, pour cette dimension, de confier la gestion du déchet amianté à l'installation de stockage de déchets dangereux.

### 5.2.5. Dimension technique

La dimension technique est composée de six critères dont l'importance de chacun d'eux est répartie de la façon ci-dessous (Figure 61) :

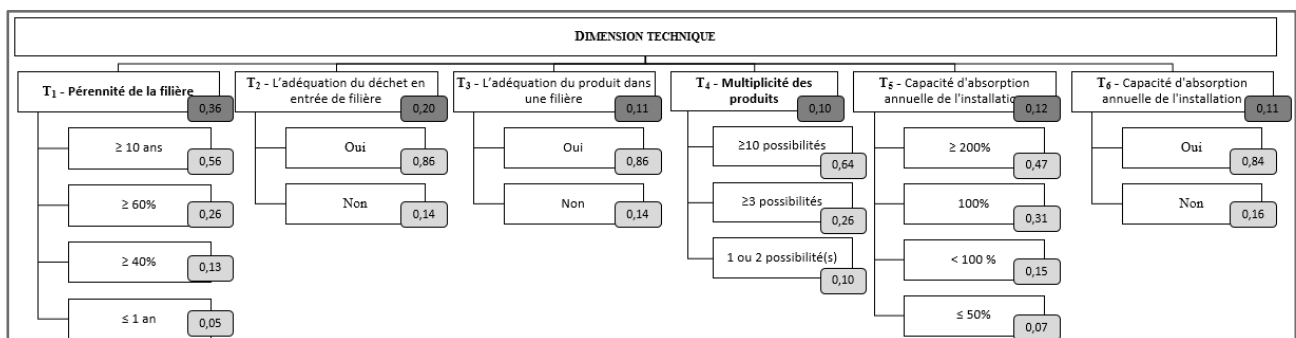


Figure 61 : Les critères techniques

#### 5.2.5.1. Critère T<sub>1</sub> – Pérennité de l'installation

On rappelle que ce critère permet d'évaluer les installations sur une échelle de temps. Dans notre cas d'étude, l'installation B permet de valoriser les déchets amiantés depuis 1992. Cette installation a connu des difficultés techniques, mais a mis en place une démarche d'amélioration continue. Une maintenance est prévue tous les deux ans. Pendant cette période, l'installation est à l'arrêt pendant sept semaines pour la remise en état du four

(remplacement des réfractaires). Un arrêt régulier de quatre semaines (tous les quatre mois) permet une maintenance préventive des équipements<sub>[230]</sub>. La société EMTA, filiale de SARP Industries, société du Groupe Veolia Environnement, exploite actuellement un site en Ile de France depuis le 21 novembre 1985<sub>[239]</sub>. À partir de ces informations, les deux installations obtiennent la note maximale de 0,56 sur ce critère (*Tableau 118*).

Tableau 118 : Les score des deux installations sur le critère T<sub>1</sub>

INSTALLATIONS	NOTES	POIDS	SCORE
Installation A	0,56	0,36	0,20
Installation B	0,56		0,20

Cette nouvelle ressource est concassée par une entreprise sous-traitante pour atteindre une granulométrie de 0/80 mm. La vitrification permet de récupérer 60 % de la quantité en entrée du four. Ainsi, l'installation B obtient le score 0,06.

### 5.2.5.2. Critère T<sub>2</sub> – Adéquation du déchet en entrée d'installation

Pour qu'un déchet puisse être dirigé vers une voie de valorisation (ou dans le cas présent d'élimination), il doit exister une adéquation entre les caractéristiques techniques requises en entrée de l'installation et celles du flux de déchet<sub>[2]</sub>. Ces prescriptions techniques, autrement dit le cahier des charges, sont établies à partir de guides, de normes ou par la réglementation.

L'installation B a établi une liste précise des déchets amiantés acceptés. Celle-ci est disponible sur le site d'internet de l'installation. La société reconnaît que plusieurs d'entre eux peuvent poser des problèmes au procédé<sub>[230]</sub>, c'est pourquoi elle a établi en collaboration avec le groupe EDF un cahier des charges précis sur les conditions de collecte, de transport et de traitement<sub>[240]</sub>.

L'ISDD ne dispose pas de cahier des charges particulier, mais la réglementation, liée à l'acceptabilité des déchets amiantés en installation de stockage de déchets, est très fournie. Le *Tableau 119* montre que les deux installations obtiennent un score identique sur ce critère.

Tableau 119 : Les scores des deux installations sur le Critère T<sub>2</sub>

NIVEAU DE L'ECHELLE	NOTES	POIDS	SCORE
Installation A	0,86	0,20	0,17
Installation B	0,86	0,20	0,17

### 5.2.5.3. Critère T<sub>3</sub> – Adéquation du produit dans une filière

Ce critère permet de contrôler l'éventuelle existence d'un encadrement vis-à-vis de la ressource valorisée. Cette dernière doit respecter la législation et les normes applicables aux produits ou répondre à un cahier des charges pour être utilisée convenablement. Le COFALIT<sub>[241]</sub><sup>45</sup> a subi plusieurs tests normés qui ont permis de montrer le caractère inerte de cette ressource. Cette ressource est valorisée en sous-couche routière car elle répond au cahier des charges de la technique routière. Par conséquent, l'installation B obtient un score de 0,16. L'installation A n'est pas pénalisée sur ce critère, mais obtient un score nul (*Tableau 120*).

Tableau 120 : Les scores des deux installations sur le critère T<sub>3</sub>

NIVEAU DE L'ECHELLE	NOTES	POIDS	SCORE
Installation A	0,84	0,11	0,16
Installation B	0		0

<sup>45</sup> Produit issu de la vitrification de déchets amiantés se présentant comme un verre noir ou une roche basaltique



#### 5.2.5.4. Critère T<sub>4</sub> – Multiplicité d'utilisation du produit

Ce critère permet de mesurer, le nombre de possibilités d'utilisation du produit (issu du déchet) en sortie d'installation. On considère qu'une installation de valorisation est d'autant plus intéressante que la ressource créée présente plusieurs débouchés d'utilisation. Seule l'installation de vitrification permet une valorisation de la matière puisque celle-ci est valorisée en sous-couche routière, ce qui lui permet d'obtenir le score de 0,01. L'influence de ce critère sur l'ensemble des résultats de la dimension technique est à confirmer par une analyse de sensibilité puisque deux voies de valorisation supplémentaires du COLAFIT sont en cours de recherche<sup>[242]</sup>.

#### 5.2.5.5. Critère T<sub>5</sub> – Capacité d'absorption annuelle de l'installation

Les deux installations ont des capacités de traitements très différentes. L'arrêté préfectoral précise que seules 250 000 tonnes de déchets dangereux peuvent être traitées annuellement dans l'installation A. L'installation B est, quant à elle, autorisée à prendre en charge 7 000 tonnes de déchets amiantés, mais l'établissement, pour des raisons techniques (optimisation), a diminué sa capacité de traitement à 4 800 tonnes. Les deux installations se positionnent à un niveau équivalent sur l'échelle du critère (Tableau 121). Elles obtiennent le score 0,07.

Tableau 121 : L'échelle du critère T<sub>5</sub>

NIVEAU DE L'ECHELLE	≥ 200 %	100 %	< 100 %	≤ 50 %
Notes	0,50	0,31	0,14	0,05
Installations	A et B	-	-	-

Bien qu'EDF ne représente qu'un client très limité de l'installation B en 2015 (environ 360 tonnes envoyées pour 6 800 tonnes traitées au total par l'installation), cette dernière aurait certainement des difficultés à traiter l'ensemble de la production de déchets amiantés engendrés par EDF. En effet, la quantité de déchets (2 600 tonnes en 2015) représenterait plus de 54 % de la capacité de l'installation de valorisation. La société se trouverait alors, probablement, dans l'incapacité à répondre à l'ensemble de ses clients actuels.

#### 5.2.5.6. Critère T<sub>6</sub> – Flexibilité d'absorption de l'installation

L'une des caractéristiques des installations de gestion des déchets est la capacité à accepter des fluctuations quantitatives de déchets. Dans notre contexte, les deux installations ne sont pas identiques sur cette caractéristique. Il est clair que l'installation A (comme pour l'ensemble des ISDD) a une flexibilité nettement supérieure à celle de la société de vitrification. En conséquence, elle se positionne sur le niveau supérieur de l'échelle du critère avec une note de 0,84. L'installation B rencontre, parfois, des difficultés à traiter dans les temps réglementaires l'ensemble des déchets présents sur son site. Elle obtient alors la note 0,14 (Tableau 122).

Tableau 122 : Les scores des deux installations sur le critère T<sub>6</sub>

NIVEAU DE L'ECHELLE	NOTES	POIDS	SCORE
Installation A	0,84	0,11	0,84
Installation B	0,14		0,01

#### 5.2.5.7. Résultats sur la dimension technique

La Figure 62 ci-dessous montre les résultats de la comparaison par critère. Elle précise également les résultats de la comparaison en fonction des changements d'hypothèses (analyses de sensibilité). Les hypothèses de base donnent un avantage à l'installation de vitrification sur cette dimension grâce nettement, aux critères T<sub>3</sub> et T<sub>4</sub>. On remarque qu'une modification de la position de l'installation B sur l'échelle du critère T<sub>3</sub> (niveau supérieur) est négligeable sur l'ensemble des résultats.

Le troisième couple d'histogrammes représente le cas où l'installation B n'est plus en mesure d'accepter le double de la quantité de déchets produits par EDF (critère T<sub>4</sub>). Malgré ce changement, cette installation reste,

légèrement, la meilleure voie d'orientation sur l'ensemble de la dimension. Enfin, le dernier couple d'histogrammes montre que l'ISDD est à prioriser dans le cas où l'installation B n'est plus en mesure d'accepter plus de 50 % des déchets produits par EDF.

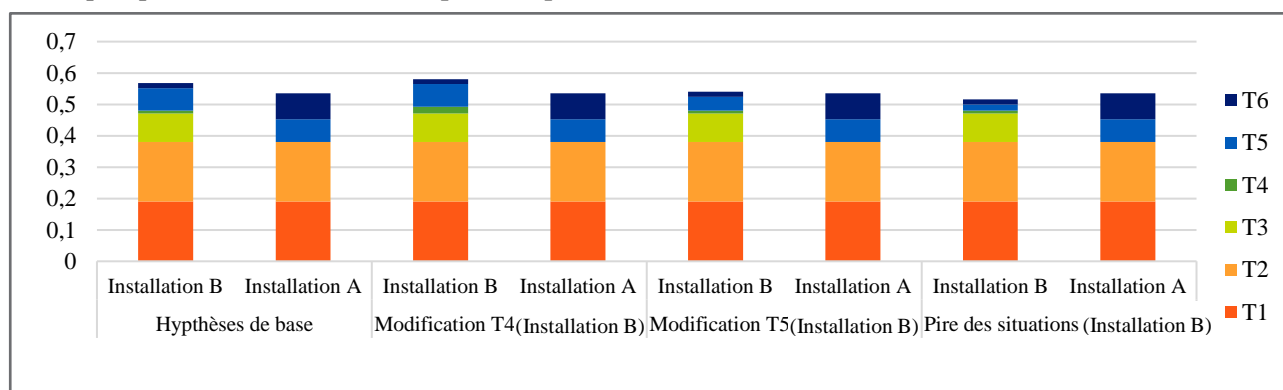


Figure 62 : La synthèse des résultats et analyses de sensibilité sur la dimension technique

L'installation B est la voie de gestion à prioriser d'après les critères de la dimension technique, à la condition de garder le fonctionnement actuel.

### 5.2.6. Synthèse de la comparaison

La comparaison a été effectuée sur le déchet amianté 17 06 01\* correspondant aux calorifuges avec amiante libre, déchets de désamiantage et de déflocage. S'agissant de comparer les installations A et B sur les critères établis dans le cadre des travaux de thèse. Ce cas d'étude est intéressant du fait de son caractère « extrême » :

*Est-il préférable de valoriser à 734 kilomètres ou d'éliminer à moins de 8 kilomètres ?*

Pour ce cas d'étude et plus généralement sur les déchets amiantés, il n'y aura pas de conclusions générales (pour des raisons de confidentialité).

## 5.3. DISCUSSION

Plusieurs tests et études de cas sur les déchets amiantés ont été menés avant d'arriver à ce modèle fini. Le choix de tester notre modèle sur les installations de gestion des déchets amiantés a été motivé par deux principales raisons.

La première est que nous avons rassemblé plusieurs données économiques via les travaux de Fanny TAVERNIER qui était en contrat d'alternance (EDF/UTT) du 1<sup>er</sup> septembre 2015 au 31 août 2016. En effet, les aspects sont peu étudiés et/ou les résultats d'études les concernant sont confidentiels, les bases de données sont peu nombreuses et la pression concurrentielle rend les acteurs économiques relativement discrets. Les travaux de Fanny ont permis de recueillir des éléments de coût et de les regrouper dans une base de données sur les déchets amiantés.

La seconde est que la comparaison des installations de gestion déchets amiantés est un cas facile puisqu'il n'existe que deux solutions totalement opposées. En effet, l'une permet de valoriser les déchets amiantés alors que l'autre solution propose de les éliminer en installation de stockage de déchets dangereux ou non dangereux.

Ce cas test sur les déchets amiantés a également permis de confirmer l'hypothèse d'agrégation choisie. Pour rappel, au Chapitre 3 — §3.6.1.4, nous avons vu qu'il existe deux solutions pour synthétiser différents avis d'experts :

- l'agrégation des jugements individuels (amont de la matrice de comparaison),
- l'agrégation des poids relatifs individuels (aval de la matrice de comparaison).

La première méthode consiste à combiner les préférences des experts interrogés afin d'établir un indice unique reflétant les préférences agrégées. La seconde méthode s'intéresse aux résultats établis par les préférences des experts. L'agrégation s'effectue alors à partir des poids établis par chacun des experts.

A titre d'exemple, la *Figure 63* ci-dessus montre les pondérations pour les critères de la dimension économique. La partie de gauche du graphique représente l'importance des critères suite à une agrégation des notes établies à partir du jugement de chaque individu alors que la partie droite, correspond à la pondération issue d'une d'une agrégation des préférences individuelles.

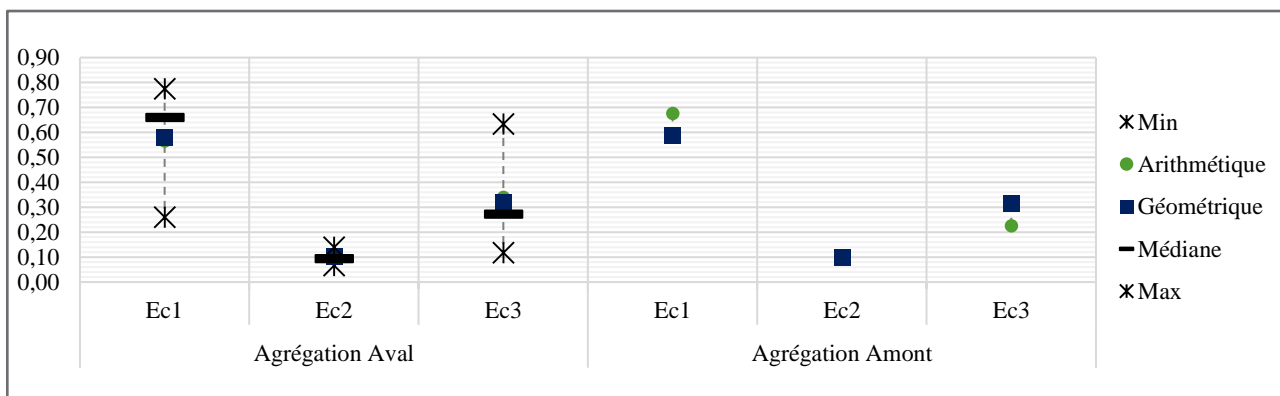


Figure 63 : Représentation graphique des poids des critères de la dimension économique

En analysant la figure, on remarque que quelle que soit la méthode d'agrégation et le type de moyenne utilisé, les résultats des cas d'études sont sensiblement les mêmes et que l'ordre des résultats n'est pas inversé. Les mêmes conclusions s'observent sur les autres dimensions.

Ce choix est également conforme aux recommandations issues de la littérature *Chapitre 3 - §3.6.1.4*.

Ce cas test a également permis de montrer que les critères retenus répondent au cahier des charges que nous avons définis au point §3.4.1 du *Chapitre 3* :

- exhaustivité : les échanges avec les différents experts montrent que les problématiques majeures de choix entre deux installations sont abordées. Bien qu'il soit difficile de prouver l'exhaustivité, on considère que les critères retenus sont aujourd'hui nécessaires pour évaluer, comparer et faire un choix d'orientation ;
- cohérence : les avis des experts de construction et de confrontation ont largement démontré que les critères sont directement liés à la problématique ;
- non-redondance : les critères abordent des notions différentes puisqu'ils n'ont pas la même finalité ;
- pertinence : ce cas test montre que les critères répondent bien à un besoin et qu'ils sont utiles à la prise de décision ;
- clarté : à chaque critère correspond une définition qui est précisée par une question. Les échelles permettent de les interpréter facilement ;
- accessibilité : l'accès aux données peut être difficile comme nous l'avons vu. Cependant, le cas extrême de l'amiante a montré que tous les critères peuvent être complétés, parfois au moyen d'hypothèses issues du terrain.

Les résultats issus de ces études ont été présentés et analysés critère par critère lors de réunion de pilotage (experts de construction) et lors de réunions avec des experts de confrontation. Les différents cas d'études sur les déchets amiantés ont permis d'établir des conclusions générales sur notre modèle. Celles-ci sont présentées dans les paragraphes ci-après. Nous proposons de présenter les critères en fonction de leur niveau d'évaluation (*Figure 64*).

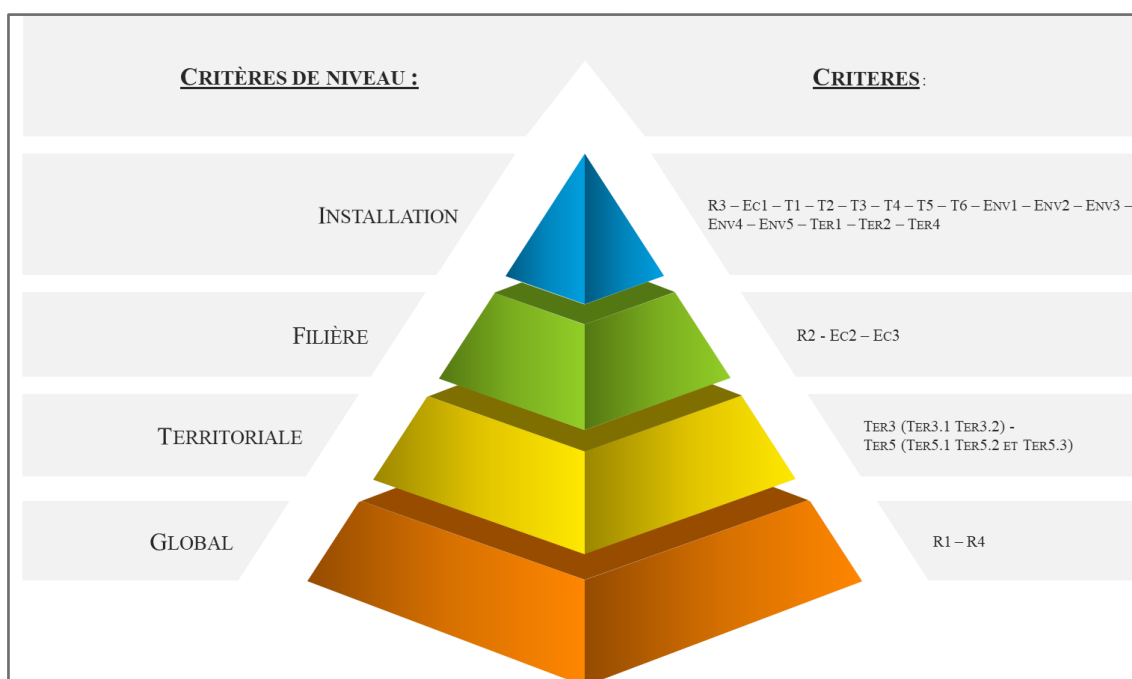


Figure 64 : Les différentes catégories de critères

Cette représentation montre qu'il existe 4 grandes catégories de critères, les critères d'ordres globaux, territoriaux, de niveau filière ou plutôt liés à l'installation.

Ensuite, nous nous sommes aperçus qu'il est possible de classer les critères en 2 catégories (Tableau 123) :

- les critères d'évaluation puis de comparaison (EC),
- les critères de comparaison, d'évaluation puis de comparaison (CEC).

Tableau 123 : Les critères d'EC et de CEC

DIMENSION	LES CRITERES D'ÉVALUATION PUIS DE COMPARAISON (EC)	LES CRITERES DE COMPARAISON, D'ÉVALUATION PUIS DE COMPARAISON (CEC).
Réglementaire	R <sub>1</sub> — R <sub>2</sub> — R <sub>4</sub>	R <sub>3</sub>
Technique	Tec <sub>1</sub> — Tec <sub>2</sub> — Tec <sub>3</sub> — Tec <sub>4</sub> — Tec <sub>5</sub> — Tec <sub>6</sub>	
Environnementale	Env <sub>1</sub> — Env <sub>3</sub>	Env <sub>2</sub> — Env <sub>4</sub> — Env <sub>5</sub>
Territoriale	Ter <sub>1</sub> — Ter <sub>2</sub> — Ter <sub>4</sub> — Ter <sub>5.1</sub> — Ter <sub>5.2</sub> — Ter <sub>5.3</sub>	Ter <sub>3.1</sub> — Ter <sub>3.2</sub>
Économique	Ec <sub>2</sub> — Ec <sub>3</sub>	Ec <sub>1</sub>

La première catégorie propose d'abord d'évaluer les installations selon l'échelle du critère. Les installations peuvent être évaluées indépendamment les unes des autres. Les critères de la seconde catégorie proposent d'abord une étape de comparaison entre les installations.

Au cours des études de cas, nous nous sommes aperçus que le fonctionnement des critères est différent selon le type d'échelle d'évaluation. Nous avons essayé de résumer les deux types de fonctionnements à l'aide de la Figure 65 ci-après.

Dans la première catégorie, la note des installations est donnée par l'échelle d'évaluation du critère. Chaque installation obtient une note qui correspond au positionnement de l'installation sur l'un des niveaux des échelles de critères. Dans la seconde catégorie, il faut exécuter une série d'étapes successives afin d'obtenir les notes des installations qui sont données à la fin d'une matrice de comparaison.

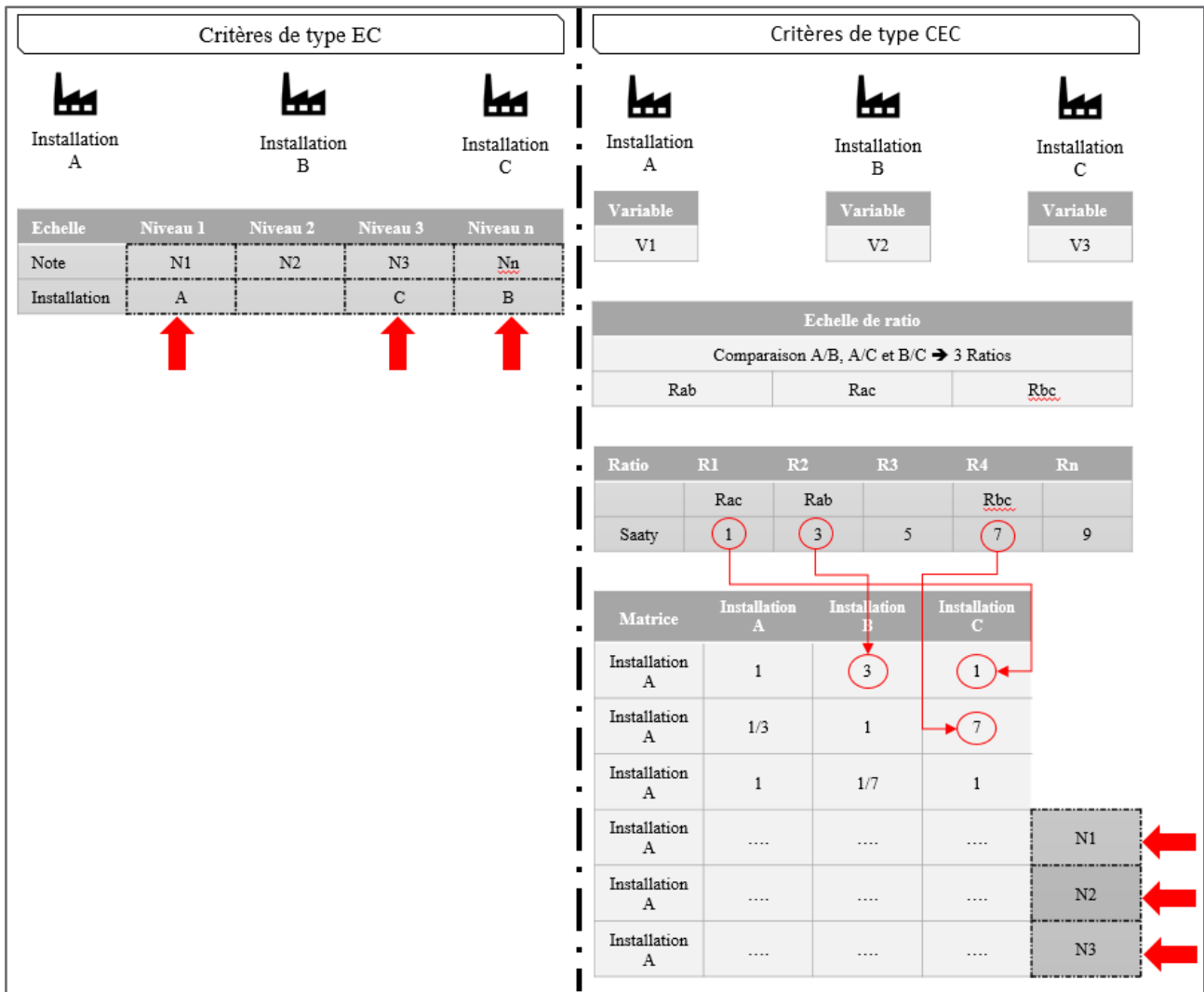
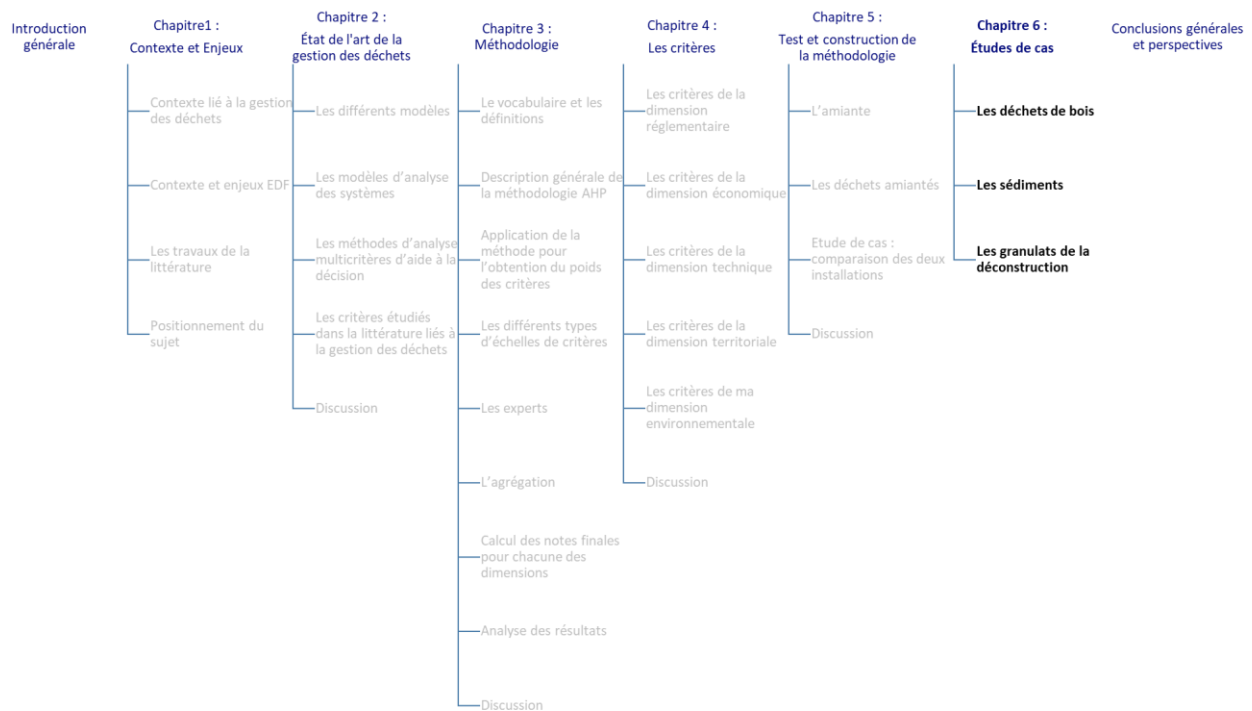


Figure 65 : Les 2 types de fonctionnements des critères

Dans le chapitre suivant, il s'agit d'appliquer notre modèle sur le cas des déchets de bois, des sédiments de barrages hydro-électriques et les gravats issus de la déconstruction.

# CHAPITRE 6 : LES ETUDES DE CAS



## RESUME

Dans ce chapitre, nous présentons successivement trois études de cas :

- les déchets de bois,
- les sédiments,
- les granulats issus de la déconstruction.

Ces différentes études démontrent le large spectre d'applications de l'outil. Par ailleurs, chaque cas d'étude a permis d'apporter des modifications dans la méthodologie de travail. Enfin, les cas d'études sur ces déchets ont fait l'objet de conférences scientifiques :

- Buronfosse Mickael, Sokha Leang, Youcef Bouzidi, Nicolas Antheaume, et François Thery. 2017. « *Selection of use channels for dredged sediments : a multicriteria analysis approach* ». In , 27-32. Editions Paralia. <https://doi.org/10.5150/cmcm.2017.006>.
- Buronfosse Mickael, Sokha Leang, Youcef Bouzidi, Nicolas Antheaume, et François Thery. 2018. « *Approche multicritères pour le choix d'une installation de valorisation de déchets : application aux sédiments de l'écluse de Strasbourg (Rhin, France)* ». In XVèmes Journées, La Rochelle, 617-24. Editions Paralia. <https://doi.org/10.5150/jngcgc.2018.071>.
- Buronfosse Mickael, Nicolas Antheaume, Sokha Leang, Youcef Bouzidi, et François Thery. 2018. « *Construction d'un outil de gestion environnementale. Cas de la gestion des déchets* ». 39e congrès de l'AFC, Nantes 2018, (in press)
- Buronfosse Mickael, Youcef Bouzidi, Nicolas Antheaume, Sokha Leang et François Thery. 2018. « *Selection of recovery paths for industrial waste : a multicriteria analysis approach* ». WasteEng, Prague 2018.

## SOMMAIRE DU CHAPITRE 6

<b>6.1. LES DÉCHETS DE BOIS</b>	<b>162</b>
6.1.1. Les enjeux liés à la gestion des déchets de bois au niveau national	162
6.1.2. Les déchets de bois au niveau de l'entreprise EDF	163
6.1.3. Les différentes solutions de valorisation	163
6.1.4. Les problématiques liées à la gestion des déchets de bois	168
6.1.5. Conclusion sur les filières	168
6.1.6. Études de cas portant sur les déchets de bois	169
6.1.6.1. Mise en contexte	169
6.1.6.2. Résultats	169
6.1.7. Présentation des résultats et discussion	172
6.1.7.1. Dimension économique	172
6.1.7.2. Dimension réglementaire	173
6.1.7.3. Dimension technique et environnementale	173
6.1.7.4. Dimension territoriale	174
6.1.8. Discussion générale sur le cas d'étude	174
<b>6.2. LES SEDIMENTS</b>	<b>175</b>
6.2.1. Les enjeux liés aux sédiments	175
6.2.2. Les différentes solutions de valorisation	176
6.2.3. Conclusion sur les filières	182
6.2.4. Étude de cas portant sur les sédiments	182
6.2.4.1. Mise en contexte	182
6.2.4.2. Résultats	183
6.2.5. Présentation des résultats et discussion	185
6.2.5.1. Dimension réglementaire	185
6.2.5.2. Dimension économique	185
6.2.5.3. Dimension technique	186
6.2.5.4. Dimension environnementale	187
6.2.5.5. Dimension territoriale	188
6.2.6. Discussion générale sur le cas d'étude	188
<b>6.3. LES GRANULATS DE LA DECONSTRUCTION</b>	<b>188</b>
6.3.1. Les enjeux liés à la gestion des déchets du BTP	189
6.3.2. Les granulats	189
6.3.3. L'utilisation et la consommation des granulats	189
6.3.4. Les différentes solutions de valorisation	190
6.3.5. Conclusion sur les filières	193
6.3.6. Étude de cas portant sur les granulats de la déconstruction	193
6.3.6.1. Mise en contexte	193
6.3.6.2. Résultats	194
6.3.7. Présentation des résultats et discussion	196
6.3.7.1. Dimension réglementaire	196
6.3.7.2. Dimension économique	196
6.3.7.3. Dimension technique	197
6.3.7.4. Dimension environnementale	198
6.3.7.5. Dimension territoriale	199
6.3.8. Discussion générale sur le cas d'étude	199
<b>6.4. DISCUSSION</b>	<b>200</b>



## INTRODUCTION

---

Dans ce chapitre nous répondons à l'un des objectifs scientifiques et opérationnels que nous avons fixés au *Chapitre 1 - §1.4.3* à savoir, étudier trois flux de déchets (les déchets de bois, les sédiments et les granulats issus de la déconstruction et de comparer les installations de gestion par déchets.

Ces flux ont été retenus pour plusieurs raisons :

- les déchets de bois possèdent des filières de gestion connues et bien établies notamment pour les palettes, les déchets de bois vert ou de bois traités. En revanche, pour les bois d'essartement, les filières sont encore à inventer, mais nous avons pu nous appuyer sur des résultats de déchets de bois connus. Par exemple pour les bois d'essartement issus du lit de La Durance nous avons investigué plusieurs solutions de valorisation : la filière de fabrication des panneaux de particules, la chaufferie biomasse, l'industrie papetière, la fabrication de bois d'œuvre, le compostage ou encore les filières de paillage et de méthanisation,
- les sédiments sortis de l'eau sont identifiés comme des déchets depuis la directive-cadre de 2008. C'est une problématique récente avec de forts enjeux pour EDF par rapport aux quantités produites par les ouvrages hydroélectriques. Aujourd'hui, les voies de valorisation sont encore à inventer, mais nous proposons de comparer des installations de gestion potentielles afin de déterminer comment orienter les efforts d'investigations à mener pour lever les problématiques de valorisation,
- les gravats issus de la déconstruction représentent un enjeu national du fait de l'accessibilité et de la raréfaction des ressources naturelles. Au niveau d'EDF, la déconstruction des anciennes unités de production du parc thermique engendre plusieurs milliers de tonnes de granulats. Les gestionnaires de déchets ont le choix entre plusieurs voies de valorisation bien établies, mais aussi de nouvelles qui font l'objet de travaux de recherche et de tests industriels. Par exemple, la déconstruction de centrale de Vaires-sur-Marne (77) a produit environ 20 000 tonnes de granulats qui ont été valorisés. Ces derniers ont été réutilisés pour réhabiliter le remblai du site qui accueille aujourd'hui le bâtiment direction de la déconstruction post exploitation (CPE). Dans le cas de Vitry-sur-Seine, les décideurs opérationnels doivent valoriser plus de 60 000 tonnes de gravats.

Ces déchets ne sont pas spécifiques à EDF et ce travail peut donc intéresser d'autres acteurs (entreprises ou collectivités) qui ont des quantités tout aussi importantes.

Les trois cas d'études qui sont présentés dans ce chapitre sont des cas d'application, mais également des cas destinés à perfectionner l'outil. Ces études s'appuient sur la présence de stagiaires, non impliqués dans la conception de la méthode. Ils ont été mobilisés pour accélérer la collecte de données dans les champs de spécialités correspondant à leur étude. Leur travail a également apporté un regard extérieur.

La discussion en fin de chapitre reviendra sur les améliorations auxquelles chaque étude a contribué.

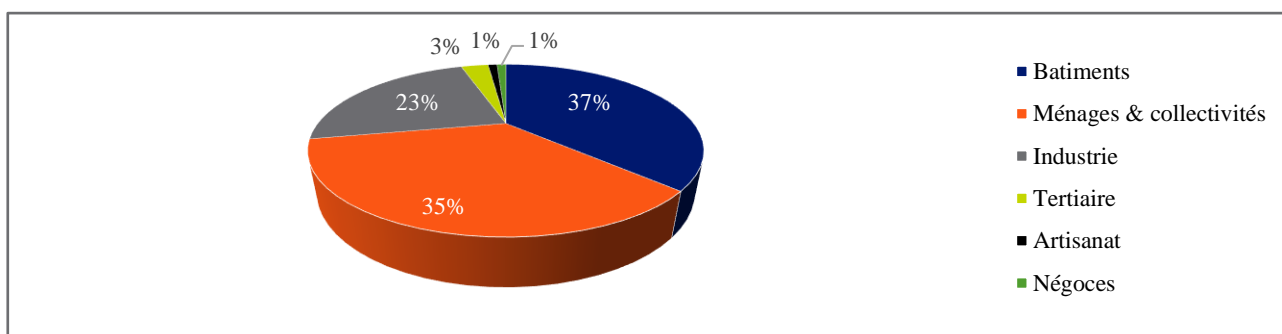
## 6.1. LES DÉCHETS DE BOIS

La gestion des déchets de bois est une problématique importante pour le Groupe EDF et plus particulièrement pour les gestionnaires du parc hydraulique. On retrouve principalement le bois d'essartement, le bois flottant ou le bois des palettes usagées. Ces déchets, en fonction de leurs caractéristiques et de leur dangerosité, peuvent être valorisés de différentes façons.

### 6.1.1. Les enjeux liés à la gestion des déchets de bois au niveau national

Les déchets de bois regroupent à la fois les matières générées par les activités de la filière bois (exploitation forestière, scieries) et celles d'autres activités comme la construction et la déconstruction. De manière générale, tous les acteurs économiques utilisant des objets en bois sont potentiellement des producteurs de déchets de bois. Par exemple, les ménages (ameublements intérieurs et extérieurs, rénovation de l'habitat), les entreprises (mobilier, emballages), le secteur du bâtiment (construction et déconstruction) et le génie civil (mobilier urbain, traverses de chemin de fer, aménagements routiers). Cette variété de produits et d'utilisations implique une diversité importante des déchets et une forte variabilité des volumes.

Au sein des vingt-sept pays de l'Union européenne, ce sont près de 42 millions de tonnes de déchets de bois qui sont produits annuellement, principalement par l'Allemagne, la France, le Royaume-Uni, l'Italie et la Finlande. En 2012, la quantité de déchets de bois produits par la France était estimée à 7,4 millions de tonnes (hors produits connexes de sciages). Sur le territoire national, plus de 90 % du gisement, soit 6,60 millions de tonnes de déchets de bois, a été collecté<sup>[243]</sup>. Le volume restant (environ 740 000 tonnes) est, majoritairement, autoconsommé comme combustible par les sites producteurs. La *Figure 66* présente l'origine des déchets de bois produits en 2012 sur le territoire national.



*Figure 66 : Origine des déchets de bois en 2012, en France*

On remarque que le secteur industriel, celui du bâtiment et celui des ménages et des collectivités sont les plus grands producteurs de déchets de bois avec plus de 95 % du volume produit.

Il est possible de distinguer deux catégories de déchets de bois, les bois non traités (classe A) et les bois traités (classe B et C). Les premiers sont issus de bois brut et sont soumis à la réglementation générale des déchets non dangereux tandis que les seconds, sont des bois bruts ayant reçu l'ajout d'adjuvants tels que des colles, des produits de traitement (insecticides, fongicides, anti-termites, anti-bleu) ou des produits de finition (les lasures, les saturateurs et les huiles) et peuvent être amenés à être gérés comme des déchets dangereux.

La décision de la Commission du 18 décembre 2014 propose, conformément à la directive 2008/98/CE<sup>[26]</sup>, un catalogue européen des déchets (CED). Le *Tableau 124* ci-après présente quelques déchets de bois répertoriés dans le CED.

Tableau 124 : Exemples de codes de déchets européens extraits du CED pour les déchets de bois

TYPE DE DECHET	CODE DECHET
Déchets provenant de la transformation du bois et de la production de panneaux et de meubles, de pâte à papier, de papier et de carton.	03
Sciure de bois, copeaux, chutes, bois, panneaux de particules et placages contenant des substances dangereuses	03 01 04*
Emballages en bois	15 01 03
Bois	17 02 01
Bois contenant des substances dangereuses	20 01 37*
Bois autres que ceux visés à la rubrique 20 01 37 (ex : Bois flottant)	20 01 38
Déchets biodégradables	20 02 01

\* Déchets considérés comme dangereux (selon les critères énoncés à l'annexe I, partie 2 à 5, du règlement [CE] n° 1272/2008).

Il existe également d'autres classifications des déchets de bois. Une courte présentation de celle-ci est disponible en *Annexe 6.1*.

### 6.1.2. Les déchets de bois au niveau de l'entreprise EDF

Le Groupe EDF possède une base de données appelée OGIDE (Outil de Gestion et d'Inventaire des Déchets à EDF) qui permet l'inventaire et le suivi des déchets conventionnels produits par les sites de l'entreprise. L'étude de cette base de données révèle qu'EDF a produit près de 50 000 tonnes de déchets de bois entre 2010 et 2016 (*Figure 67*), ce qui représente annuellement environ 2 % de la production de déchets.

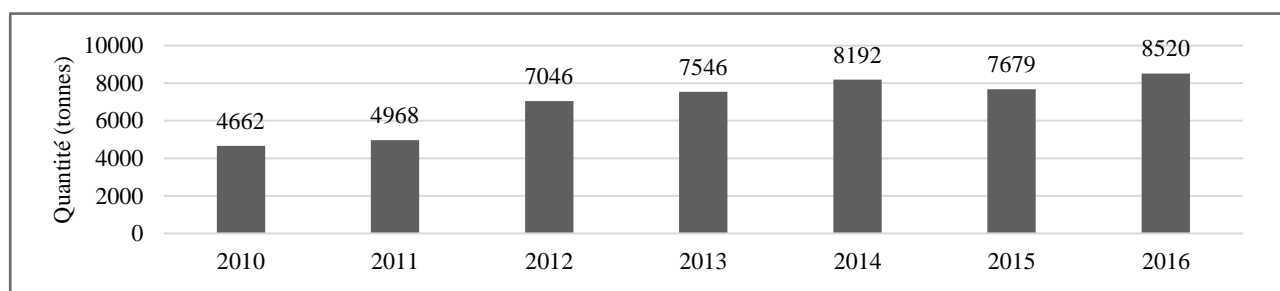


Figure 67 : Évolution des quantités (tonnes) de bois produits par EDF de 2010 à 2016

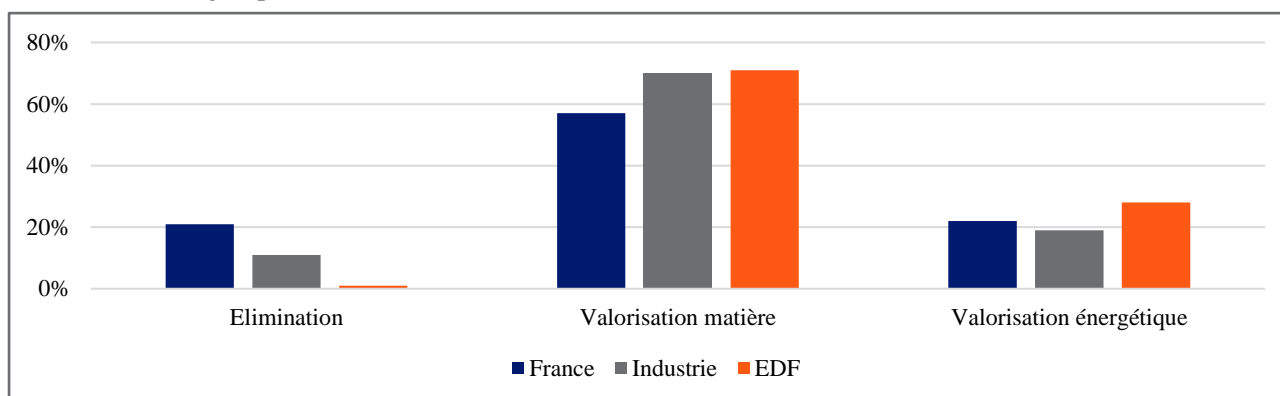
La gestion des déchets de bois est aujourd'hui l'une des priorités nationales. Certaines dispositions doivent être prises pour trier et favoriser la valorisation de cinq flux de déchets, dont le bois. Celles-ci sont précisées par le décret d'application du 10 mars 2016<sup>[30]</sup> et font pour les déchets d'emballages (dont emballages en bois), l'objet d'une réglementation spécifique<sup>[244]</sup>.

### 6.1.3. Les différentes solutions de valorisation

Les déchets de bois cités dans le *Tableau 124* peuvent suivre différentes voies de gestion. Les voies de valorisation matière permettent l'utilisation de tout ou d'une partie d'un déchet en remplacement d'un élément ou d'une matière première conventionnelle. Par exemple, les déchets de bois peuvent alors être incorporés dans la fabrication de panneaux en bois, être orientés dans des filières de valorisation de matières organiques ou encore, dans la production de pâte à papier. Par ailleurs, ils peuvent intégrer des filières de valorisation énergétique, mais là encore il existe différentes solutions comme la valorisation sur le site de production, en chaufferie collective dédiée, en chaufferie collective sur réseau de chaleur ou en chaufferie industrielle.

La destination des flux de déchets de bois varie en fonction des pays<sup>[245]</sup> et des secteurs producteurs<sup>[246]</sup>. À ce jour, l'enfouissement est le mode de gestion le plus important pour les déchets de bois provenant des ménages, des collectivités, du secteur du bâtiment alors que les secteurs industriels et tertiaires optent d'abord pour une valorisation matière ou énergétique.

À l'échelle nationale, la *Figure 68* ci-dessous montre que l'ensemble des secteurs producteurs de déchets de bois orientent majoritairement leurs déchets vers des filières de valorisation matière, puis vers des filières de valorisation énergétique et enfin vers des filières d'élimination<sup>[246]</sup>.



*Figure 68 : Destination des déchets de bois en France, pour l'industrie et chez EDF pour l'année 2012*

Les sections suivantes vont présenter succinctement les filières méthanisation, papetière, compostage, de paillage et de manière plus précise les filières énergie et panneaux de particules. Nous justifions ce choix du fait que ces deux dernières filières sont les plus développées industriellement. Nous avons décidé de ne pas présenter la filière d'élimination puisque cette dernière ne permet pas de répondre aux objectifs de valorisation.

### La filière papetière

Les feuilles de papier et les cartons sont fabriqués à partir d'une pâte à papier, composée de fibres de cellulose. Ces fibres sont en partie extraites du bois provenant de coupes d'éclaircies de forêts, de sciures issues d'industries de transformation du bois, et de papier/cartons recyclés<sup>[247]</sup>. Les essences les plus utilisées sont les résineux à fibres longues (pin, sapin, épicéa) et les feuillus à fibres courtes (bouleau, hêtre, charme, châtaignier, peuplier ou encore eucalyptus).

Dans le cadre du projet de recherche Demowood, des études issues d'une collaboration entre VEOLIA, la FCBA et le CTP ont tenté de trouver des solutions permettant d'intégrer des déchets de bois dans la filière papetière<sup>[248]</sup>. L'utilisation de bois recyclé dans cette filière est pour le moment jugée non intéressante du point de vue rapport qualité/prix. Par exemple, l'usine Norske Skog (Epinal, 88) n'utilise que du bois vert dans son process, car pour le moment, le bois recyclé ne répond pas à l'ensemble de leurs critères de qualité.

### La filière compostage

Le compostage est un procédé de transformation aérobie de matières fermentescibles dans des conditions contrôlées ». Le compost produit permet de fertiliser et de structurer les sols. En effet, les broyats de branches d'élagage, de souches ou de tailles d'arbustes ont un pouvoir structurant pour le compostage des boues d'épuration et des fumiers agricoles.

En 2012, 558 plateformes de compostage ont produit 2,5 Mt de compost. Les déchets verts entrants dans ces plateformes composaient 68 % du volume traité et seuls les déchets de bois de classe A sont acceptés. Les volumes de déchets verts à traiter sont colossaux et les plateformes spécialisées dans le compostage sont souvent saturées. Une issue économiquement viable semble difficile pour les déchets de bois d'EDF dans la filière compostage. En effet, d'après les professionnels du secteur, les marchés sont saturés et les débouchés sont peu nombreux. Inéluctablement, les prix sont à la baisse, ce qui sous-entend une augmentation du coût que doivent payer les producteurs de déchets à l'entrée des plateformes. Néanmoins, les déchets de bois verts sont susceptibles d'intéresser quelques filières locales qui se développent progressivement en France.

### La filière paillage/Bois Raméal Fragmenté (BRF)

Le paillage est un terme général qui recouvre toutes formes de matériaux (tontes, paille, carton, laine, feuilles mortes, etc.) dès qu'ils servent à recouvrir le sol afin de le protéger, réguler sa température, ralentir l'évaporation de l'eau, limiter les adventices et freiner la battance. Le bois raméal fragmenté peut servir de paillis en tant que matériau issu du broyage frais (ou de copeaux) de rameaux et de petites branches vertes d'un diamètre inférieur à 7 cm en moyenne, avec ou sans feuilles. Il est composé d'au moins 80 % de feuillus. Aujourd'hui, les demandes en volumes sont insuffisantes, voire inexistantes en France et en conséquence, très peu de filières BRF se sont développées. Ainsi, l'accès à des données concernant cette filière est très difficile et les chiffres clés ne sont pas connus.

### La filière méthanisation

La méthanisation est le processus naturel biologique de dégradation de la matière organique en l'absence d'oxygène. La matière organique dégradée se retrouve principalement sous la forme de biogaz et digestat. La méthanisation est principalement utilisée dans le but de produire de l'énergie. Elle se fait majoritairement à partir de biodéchets. La lignine est l'un des principaux constituants du bois et ses caractéristiques (stabilité) font qu'elle ne peut pas subir un processus de méthanisation.

En France, ce procédé est plutôt utilisé dans les régions où l'activité agricole est très présente, mais il est encore peu développé sur l'ensemble du territoire bien que le nombre de projets de méthanisation (en ferme ou centralisée) soit en augmentation. En effet, selon le Ministère de l'Ecologie du Développement durable et de l'Energie, le Plan Energie Méthanisation Autonomie Azote (EMAA) devrait permettre de développer en France, à l'horizon 2020, 1000 unités de méthanisation à la ferme (contre 90 fin 2012).

### La filière panneaux de process

La filière des panneaux de process constitue une filière de valorisation matière des déchets de bois. Seuls les déchets de bois de classe A ou B y sont admis. La France, deuxième producteur européen de panneaux de process, a valorisé 800 000 tonnes de déchets de bois (meubles, panneaux de process, emballages bois), dans la fabrication de panneaux de process en 2012<sup>[249]</sup>. En effet, selon leurs caractéristiques, les installations peuvent intégrer entre 30 % et 60 % de déchets de bois dans leur processus de fabrication de panneaux. En Angleterre ou en Italie, certaines usines fabriquent actuellement des panneaux composés à 100 % de bois recyclé. Les principaux acteurs de la production française de panneaux de bois sont répartis sur 21 sites du territoire national. On distingue quatre grandes catégories de panneaux de process qui sont elles-mêmes subdivisées en sous-catégorie. Chaque panneau dispose de ses propres caractéristiques normalisées (Tableau 125).

Tableau 125 : Types de panneaux de process

TYPE DE PANNEAUX DE PROCESS	
Panneaux de particules bruts (PP)	Panneau de particules CTB-S pour usage en milieu sec en construction Type P4
	Panneau particule CTB-H pour milieu humide Type P5
Panneaux de particules surfacés mélaminés (PPSM)	
Panneaux de fibres	Panneaux de fibres isolants
	Panneaux de fibres de moyenne densité (MDF)
	Panneaux de fibres durs
Panneaux de lamelles minces, longues et orientées (OSB)	OSB 1 : panneaux pour usage général et/ou agencements intérieurs, utilisés en milieu sec
	OSB 2 : panneaux utilisés en milieu sec
	OSB 3 : panneaux utilisés en milieu humide
	OSB 4 : panneaux travaillant sous contrainte élevée, utilisés en milieu humide

En France, les panneaux de particules (*Figure 69*) sont les plus fabriqués puisqu'ils représentent environ 77 % du volume de panneaux produits<sup>[246]</sup>.

Le manque de ressources naturelles constitue le principal frein à la croissance du marché des panneaux de bois. De plus, il existe une tension d'approvisionnement entre l'industrie des panneaux et celle du bois énergie. En effet, 20 % des déchets de bois d'emballages sont valorisés dans l'industrie du panneau contre 80 % en chaufferie bois.



Figure 69 : Panneau de particules (UIPP)

Cette tension s'est accentuée après la publication de l'arrêté fixant les critères de sortie du statut de déchet (SSD) pour les broyats d'emballages en bois pour un usage comme combustibles de type biomasse (valorisation énergétique). En effet, après la SSD, le broyat d'emballages bois devient un produit et n'a plus à respecter certaines contraintes juridiques strictes applicables aux déchets<sup>[250]</sup>. Cela favorise ainsi leur valorisation en tant que bois énergie.

Un schéma des étapes clés d'une usine de fabrication de panneaux est disponible en *Annexe 6.2*.

### La filière bois énergie

Les déchets de bois sont considérés comme une ressource pour la filière bois énergie. Les déchets de bois qui sont orientés dans cette filière sont des bois de moindre qualité (par rapport à du bois de grume destiné à l'ameublement) réduit en copeaux et dont la finalité est d'être brûlés pour produire de l'énergie (électricité, chaleur). En 2012, 1,4 million de tonnes de déchets de bois ont suivi la voie de la valorisation énergétique soit, sur des sites industriels soit, en chaufferies collectives<sup>[243]</sup>. En 2013, 213 000 tonnes de déchets d'emballages bois ont été valorisées énergétiquement en France<sup>[251]</sup>.

L'ADEME définit trois catégories d'origine de bois énergie dans les référentiels combustibles<sup>46</sup> :

- Les plaquettes forestières<sup>[252]</sup>,
- Les produits en fin de vie<sup>[253]</sup>,
- Les connexes des industries du bois<sup>47</sup><sup>[254]</sup>.

Les caractéristiques de ces biocombustibles leur permettent d'être brûlés dans différentes catégories de chaudières. Cependant, on note que la filière de valorisation énergétique concerne principalement les déchets de bois de classe A. En effet, très peu de chaudières sont alimentées par des déchets de bois de classe B puisqu'il est possible d'identifier des traces de colles et d'adjuvants et ces derniers nécessitent des chaudières adaptées, composées de plusieurs filtres spécifiques, représentant un gros investissement. Enfin, les déchets de bois de classe C sont des déchets dangereux impropres à une valorisation énergétique.

L'arrêté du 24 avril 2016 relatif aux objectifs de développement durable fixe des objectifs de puissance totale à installer en France pour le bois-énergie. Ainsi, la France doit disposer de 540 MW de puissance installée en 2018 et entre 790 et 1040 MW pour l'année 2023<sup>[255]</sup>. En 2016, le CIBE et Bioénergie International

<sup>46</sup> L'Association d'Initiatives Locales pour l'Énergie et l'Environnement (AILE) propose différents types de combustibles issus de déchets de bois verts ou de DIB collectés en déchetterie : les bûches, les plaquettes criblées, les plaquettes, les granulés de déchets verts, le broyat de déchets verts, le refus de compostage, le broyat de souches.

<sup>47</sup> Les connexes des industries du bois sont les résidus générés par la première et la deuxième transformation des grumes de bois : écorces, sciures, dosses, chutes diverses et plaquettes.

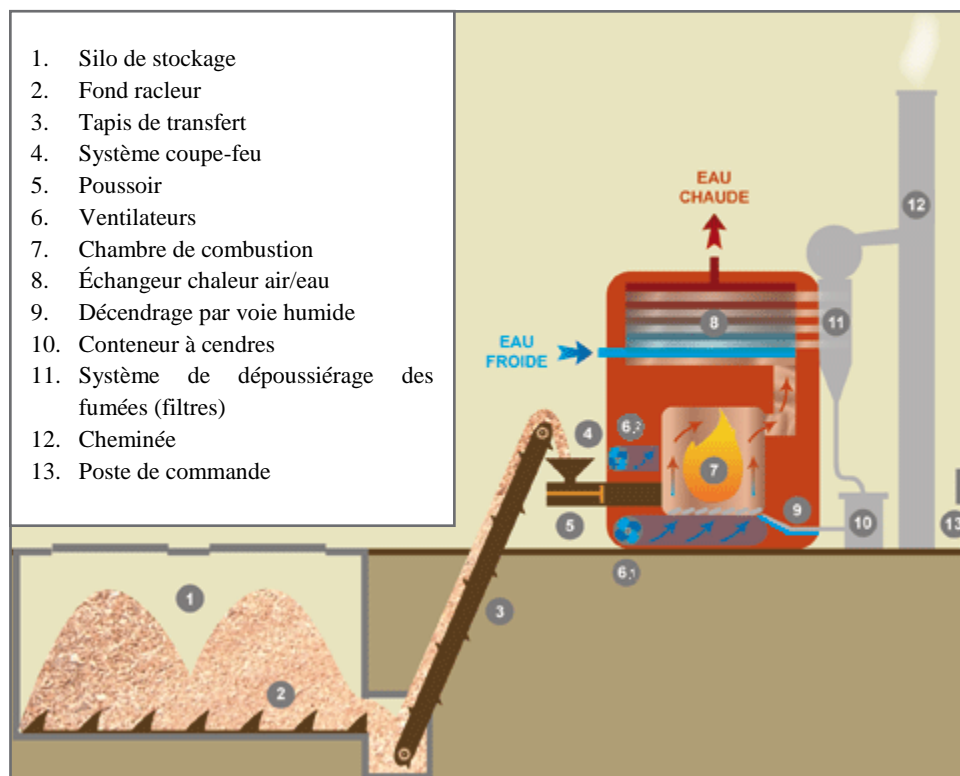


dénombrant déjà plus de 1 000 chaufferies biomasse d'une puissance supérieure à 1 MW sur le territoire national.

Les paragraphes ci-dessous détaillent plus précisément le fonctionnement d'une chaudière bois énergie. Selon l'ADEME une installation de valorisation énergétique biomasse se décompose en quatre parties<sup>[256]</sup> :

1. Le stockage du combustible,
2. L'alimentation en combustible,
3. Le générateur de chaleur
4. Le système d'épuration des rejets gazeux et d'évacuation des cendres.

La *Figure 70* suivante présente le schéma de principe d'une chaufferie bois :



*Figure 70 : Schéma de principe général d'une chaufferie bois (OFME)*

La chaudière pilote automatiquement son alimentation. Ainsi, le bois est dirigé vers un tapis de transfert (3) par l'intermédiaire d'un fond racleur qui introduit les plaquettes dans la chambre de combustion de la chaudière. C'est dans cette enceinte, revêtue de béton réfractaire, que les calories contenues dans le bois sont transmises à l'eau (fluide caloporteur). Pour assurer la combustion complète, avec un bon rendement (>80 %), et limiter les rejets polluants, le bois est brûlé à très haute température ( $\approx 890$  °C). Cependant, la matière organique se décompose vers 200 °C. Cette étape est appelée la pyrolyse, elle se poursuit jusqu'à environ 600 °C et donne naissance à des résidus charbonneux et des produits volatils. Un ventilateur d'air primaire permet d'assurer la combustion des gaz par l'apport d'oxygène. Un échangeur assure le transfert d'énergie de la chambre de combustion vers l'eau. Enfin, avant d'être extraites vers la cheminée, les fumées sont traitées par des filtres<sup>48</sup> qui retiennent les fines particules de poussières<sup>[257]</sup>. La combustion complète des plaquettes forestières permet d'obtenir un taux de cendre inférieur à 5 %. Le déchargement s'effectue automatiquement. Les cendres sous foyer sont évacuées par voie humide : un tapis avec de l'eau récupère les cendres. Elles sont ensuite raclées et poussées vers un exutoire.

<sup>48</sup> Il existe différentes techniques. L'ADEME les principes de fonctionnement des différents systèmes de dépolluissage



L'Annexe 6.3 présente les étapes de préparation des « déchets » de bois d'essartement avant d'être brûlés dans des chaufferies ICPE 2910 A ou 2910 B.

#### 6.1.4. Les problématiques liées à la gestion des déchets de bois

Les déchets de bois peuvent donc suivre différentes voies de gestion comme la valorisation matière, la valorisation énergétique et l'élimination. Néanmoins, cette dernière n'est à utiliser que pour les déchets dits « ultimes »<sup>[26], [46]</sup>. La demande de bois pour le secteur de l'énergie est en forte croissance notamment en conséquence de la politique énergétique. La France s'est donné un objectif de consommation finale d'énergie renouvelable de 23 % d'ici 2020 et doit atteindre 32 % en 2030 dans le but de tenir son engagement dans la lutte contre le réchauffement climatique<sup>[243]</sup>. Les enjeux de recyclage des déchets de bois de par leur caractère renouvelable sont alors étroitement liés à la valorisation énergétique. En effet, augmenter le recyclage et valorisation matière impacterait obligatoirement la valorisation énergétique qui se reporterait sur le bois vierge<sup>[243]</sup>.

Au niveau d'EDF, les « déchets » de bois flottant et d'essartement (non comptabilisé dans OGIDE) posent plusieurs problématiques aux gestionnaires de déchets<sup>[258]</sup>. Les bois flottants sont globalement composés de bois verts (arrachés) et de troncs d'arbres morts charriés par les rivières/fleuves alors que, les bois d'essartement sont des bois coupés en bordure de rivière/fleuve ou de routes. Ces deux types de bois posent des difficultés liées au choix de valorisation pour les unités de production hydraulique. En effet, les quantités de bois amassées fluctuent en fonction des crues et sont souvent mélangées à d'autres déchets flottants ou dépendent des campagnes d'essartements. Les qualités amassées fluctuent et entraînent des difficultés dans le choix d'une installation de valorisation sur les territoires concernés.

#### 6.1.5. Conclusion sur les filières

L'application de la démarche CLE décrite dans l'introduction générale et plus particulièrement la partie **Connaître** a permis d'identifier différentes filières de valorisation. Les gestionnaires opérationnels ont notamment le choix entre deux solutions de valorisation matière et la valorisation énergétique (Figure 71) puisque plusieurs filières ne permettent pas de valoriser les déchets de bois.

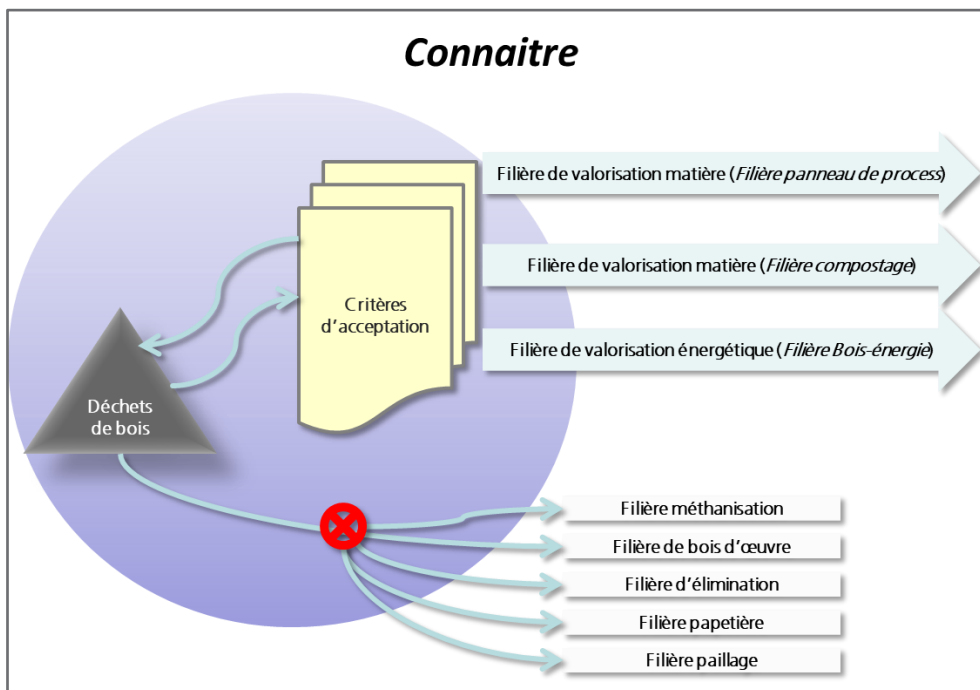


Figure 71 : Filières retenues et non retenues pour la valorisation des déchets de bois

L'élimination ne permet pas de répondre aux objectifs de valorisation des déchets de l'entreprise et la valorisation en bois d'œuvre nécessite que les essences aient reçu une sylviculture adaptée durant leur croissance. La croissance naturelle ne permet pas d'obtenir les caractéristiques suffisantes à la production de bois d'œuvre. La filière bois-énergie est possible à la condition que les caractéristiques du bois répondent à la granulométrie demandée en entrée d'installation et que le taux d'humidité soit constant sur l'ensemble du gisement mobilisé. Enfin, les cinq filières de valorisation matière correspondent à la filière papetière, de paillage, de fabrication de panneaux de bois, de compostage et de méthanisation. Cependant, les papetiers ne sont pas intéressés par le bois issu de l'essartement, la filière méthanisation n'est pas possible, car une partie du gisement n'est pas biodégradable (lignine) et enfin, la filière paillage n'est techniquement et économiquement pas adaptée.

### 6.1.6. Études de cas portant sur les déchets de bois

#### 6.1.6.1. Mise en contexte

Parmi tous les déchets de bois d'EDF identifiés, nous proposons d'effectuer une analyse des voies d'orientation pour les bois d'essartement sur un cas d'étude précis. Ces flux sont majoritairement composés de bois coupés en bordure de rivières/fleuves ou de routes.



Figure 72 : Lit de la Durance

Au niveau de l'entreprise, on retrouve la problématique des bois d'essartement au sein des différentes Unités de Production (UP) Hydro-électriques et plus particulièrement l'UP de Méditerranée. Cette dernière doit gérer un élagage annuel de près de 8 000 tonnes de bois dans le lit de la Durance (Figure 72). Ce programme d'essartement permet de favoriser l'écoulement des eaux, notamment lors des crues et représente de ce fait un enjeu pour la sûreté des installations.

Dans le cadre de la politique de la valorisation des déchets de l'entreprise, une réflexion a été engagée afin de trouver un principe de valorisation vertueux pour les bois d'essartement. Il est demandé aux prestataires de valoriser ce gisement annuel, mais les gestionnaires ont besoin d'aide pour faire le meilleur choix entre les voies de valorisation. Par exemple, le gestionnaire de déchet EDF en charge de l'essartement de la Durance doit faire un choix parmi une installation de fabrication de panneaux située dans le Tarn, une installation de compostage près de Manosque et une chaufferie collective d'Aix-en-Provence.

Nous proposons ici d'appliquer notre méthodologie au cas des bois d'essartement du lit de la Durance.

#### 6.1.6.2. Résultats

La première étape (après la partie connaître) est de localiser les installations liées aux filières retenues et de sélectionner les plus proches. Pour y parvenir, nous avons créé 3 bases de données d'installations :

Tableau 126 : Les bases de données créées

LES INSTALLATIONS DE FABRICATION DE PANNEAUX			LES INSTALLATIONS DE COMPOSTAGE	LES INSTALLATIONS DE BOIS ENERGIE
ICPE (3610 c)	ASTREE (NAF 1621Z)	Recherche	SINOE	Atlas (2016 et 2017)
n = 11	n = 70	n = 14	n = 771	n = 1031 dont 891 en France métropolitaine)
Linex Panneaux SAS (73 160)	Ikea Industry France (70 200)	Tarnaise des panneaux (81 290)	Plateforme de Compostage Istres (13 118)	Aix En Provence Dsp (13 100)
Unilin SAS (08440)	Compagnie française du panneau (70 320)	Armor Panneaux (56 460)	Plateforme de Compostage Martigues (13 500)	La Belle Provençale (13 130)

LES INSTALLATIONS DE FABRICATION DE PANNEAUX			LES INSTALLATIONS DE COMPOSTAGE	LES INSTALLATIONS DE BOIS ENERGIE
<i>ICPE (3610 c)</i>	<i>ASTREE (NAF 1621Z)</i>	<i>Recherche</i>	<i>SINOE</i>	<i>Atlas (2016 et 2017)</i>
<i>n = 11</i>	<i>n = 70</i>	<i>n = 14</i>	<i>n = 771</i>	<i>n = 1031 dont 891 en France métropolitaine)</i>
Steico Casteljaloux SAS (47 700)	Seripanneaux (40 230)	Kronospan (89000)	Plateforme de Compostage Tarascon (13 150)	Serres Clement (13 280)
Compagnie française du panneau (70 320)	Armor Panneaux (56 460)	Ikea Industry France (70 200)	Plateforme de Compostage Ventabren (13 122)	Réseau de chaleur Canto-Perdrix (13 110)
Swiss Krono (45 600)	Unilin SAS (08440)	Unilin SAS (08440)	plateforme de compostage de manosque (04100)	Rizerie SCS (13 200)

Le gestionnaire de déchet EDF en charge de l'essartement de la Durance doit faire un choix parmi ces installations. Il est alors confronté au questionnement suivant :

« Comment arbitrer entre les différentes voies de gestion, présentées ci-dessus, pour le devenir du bois d'essartement du lit de la Durance ? »

Les possibilités de valorisation des bois d'essartement retenues (les plus proches) sont (Figure 73) :

- la chaufferie la plus proche de la Digue du Pigeonnier est une chaufferie collective d'Aix-en-Provence (à 29 km du barrage) et sa puissance est de 16 MW,
- la plateforme de compostage se situe à Manosque soit à 32 km de la Digue du Pigeonnier,
- l'usine de production de panneaux de process la plus proche est située dans le Tarn à 164 km.

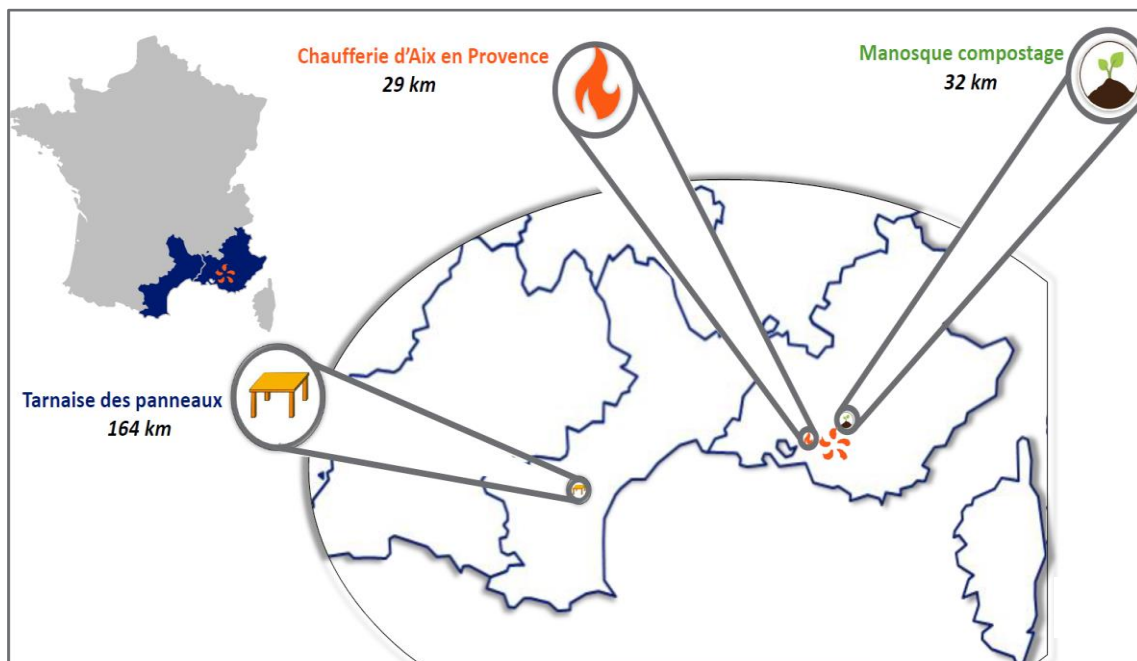


Figure 73 : Carte des installations retenues pour la valorisation des bois d'essartement

Ces installations ont été comparées via notre outil. Pour utiliser les critères, nous avons collecté les données de plusieurs façons (Tableau 127).

Tableau 127 : Les principales sources d'informations pour la comparaison des installations

OUVRAGE	REVUES, ETUDES ET RAPPORTS	INTERVIEWS	VISITES TECHNIQUES
Marcoux, Marie-Amélie, Franck Olivier, François They, et Réseau coopératif de recherches sur les déchets (France). 2016. <i>Déchets et économie circulaire : conditions d'intégration pour une valorisation en filières industrielles</i> . Paris : Lavoisier : Tec & Doc.	<b>Revue spécialisée :</b> – Le Bois International – Techniques de l'ingénieur  <b>Études et rapports :</b> – ADEME – MEDDE – FEDEREC	<b>Compostage :</b> – Véolia – AES Dordogne	Visite de la chaufferie Bois-Paille SEM énergie à Troyes (10).
		<b>Panneaux :</b> – CFP (Compagnie Française du Panneau) – UIPP (Union des Industries des Panneaux de Process) – ISOROY Panneaux de Corrèze	Visite d'une installation de fabrication de panneaux de particules (CFP Compagnie Française du Panneau) à Corbenay (70).
		<b>Palettes et déchets verts :</b> – Véolia – Burban Palettes – Rhonalpal	Visite d'une installation de fabrication de panneaux isolants Pavatex (panneaux bois isolants) à Golbey (88).

L'ouvrage consacre tout un chapitre à l'étude des déchets de bois et aux différentes filières de valorisation (matière et énergie). Les déchets de bois et la filière bois énergie font l'objet de nombreuses études l'ADEME, FEDEREC et le MEDDE. Nous avons complété nos informations via une analyse des revues spécialisées dans la valorisation des déchets en général et des déchets de bois. Pour obtenir des informations plus précises, nous avons (via Maxime PILLARD, stagiaire ESAIP à la R&D d'EDF en 2016) interviewé plusieurs personnes travaillant dans le domaine de la valorisation des déchets de bois. De plus, des visites techniques nous ont permis d'affiner certaines informations, mais aussi de comprendre le fonctionnement souvent complexe des installations de valorisation de déchets de bois.

Enfin, il s'agit d'évaluer et de comparer les installations avec notre outil. La Figure 74 ci-dessous montre les résultats globaux par dimension des trois installations comparées.

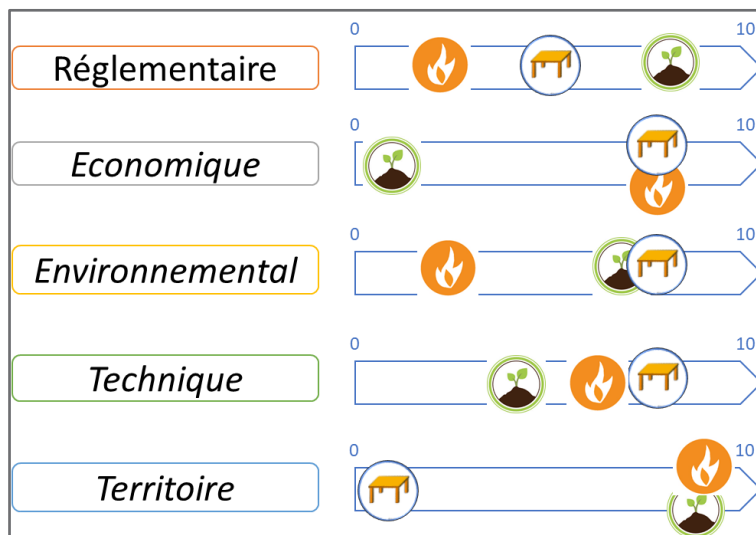


Figure 74 : Résultats de la comparaison des installations sur les 5 dimensions

Au premier regard, nous remarquons aisément qu'il n'y a pas une solution idéale, puisque chaque installation a ses forces et ses faiblesses sur chacune des dimensions. En effet, il en ressort que l'installation de compostage est la solution la plus avantageuse d'un point de vue réglementaire, mais obtient une note globale très faible sur la dimension économique. À l'inverse, il est préférable de diriger le flux de bois d'essartement vers l'installation de panneaux de process d'un point de vue économique, mais au détriment de la dimension territoriale.

### 6.1.7. Présentation des résultats et discussion

Ces résultats globaux permettent une première approche, mais ne doivent pas occulter une analyse approfondie par dimension. En effet, une analyse complète permet, notamment, de connaître les critères importants intervenus dans le calcul de la note globale, de vérifier si ces mêmes critères sont définis par un poids fort ou non et d'analyser la sensibilité des résultats en fonction du jeu de données ou des hypothèses choisies. À la fin de la démarche, le gestionnaire de déchets de bois d'essartement peut alors faire un choix selon sa sensibilité et ses enjeux.

#### 6.1.7.1. Dimension économique

Les installations comparées obtiennent des résultats différents (*Figure 75*) sur la dimension économique.

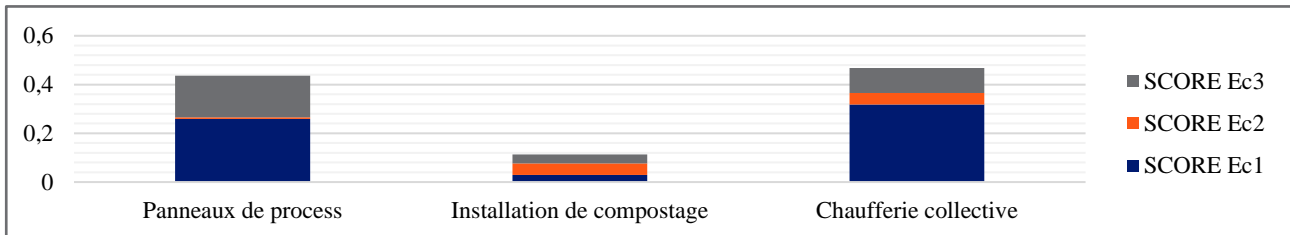


Figure 75 : Résultats de la comparaison des installations sur la dimension économique

L'installation « chaufferie collective » est l'installation dominante sur cette dimension, suivie par l'installation de fabrication de panneaux de process. Ces deux installations se distinguent de l'unité de compostage sur l'ensemble des critères, mais plus particulièrement sur les aspects coûts ( $Ec_1$  — *Coût d'utilisation de l'installation*) et l'intensité de la demande ( $Ec_3$  — *Intensité de la demande*). En effet, le marché du compostage est saturé au niveau de l'approvisionnement par la somme des déchets verts venus des points d'apports volontaires communaux et intercommunaux. Cela entraîne un score faible sur ( $Ec_3$  — *Intensité de la demande*). Ensuite, les plateformes de compostage font payer l'entrée de la matière (au lieu de la rémunérer), en la considérant comme un déchet et non comme une ressource, ce qui induit un faible score sur le critère ( $Ec_1$  — *Coût d'utilisation de l'installation*). Nous remarquons que l'installation de panneaux de process a un score très faible sur le critère  $Ec_2$  — *intensité concurrentielle* puisqu'il n'existe pas d'autres installations de cette filière dans le département et la région.

En revanche, si l'on décide d'augmenter le périmètre d'analyse et de mesurer cette intensité au niveau du bassin Sud-Ouest de la France (composé de cinq installations) on remarque sur la *Figure 76* que la note globale des deux installations est presque identique. Par ailleurs, l'installation de fabrication des panneaux de process devient prioritaire, de manière marginale, par rapport à la chaufferie collective si l'on mesure l'intensité concurrentielle de cette filière au niveau national.

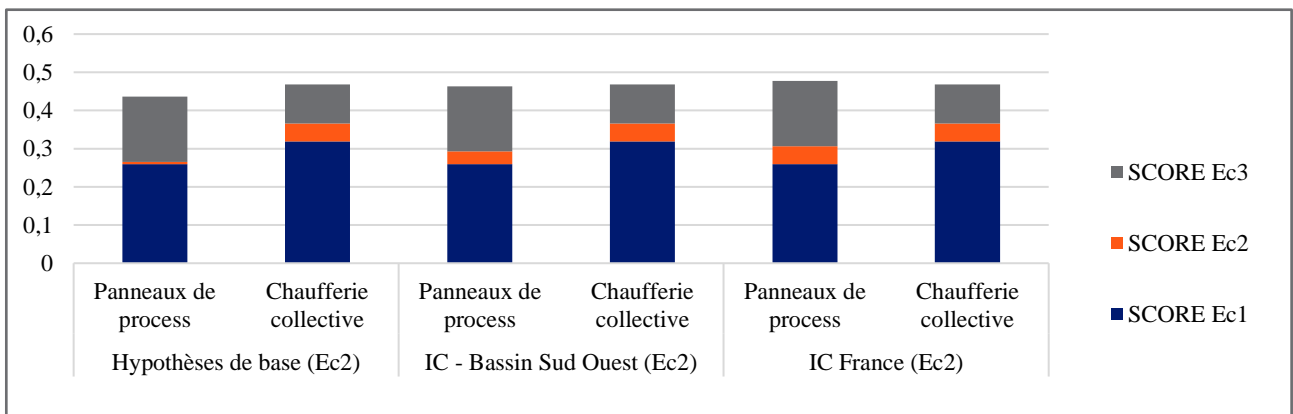


Figure 76 : Analyse de sensibilité des résultats de la dimension économique

### 6.1.7.2. Dimension réglementaire

Sur la dimension réglementaire (Figure 77), on remarque que la chaufferie collective est la moins bonne des solutions par rapport aux scores obtenus sur le critère  $R_1$  — *Hiérarchie de gestion des déchets* et le  $R_4$  — *Respect des objectifs de l'entreprise*. On rappelle que la valorisation énergétique du bois fait partie des objectifs de la loi de la Loi de Transition Énergétique pour la Croissance Verte (LTECV).

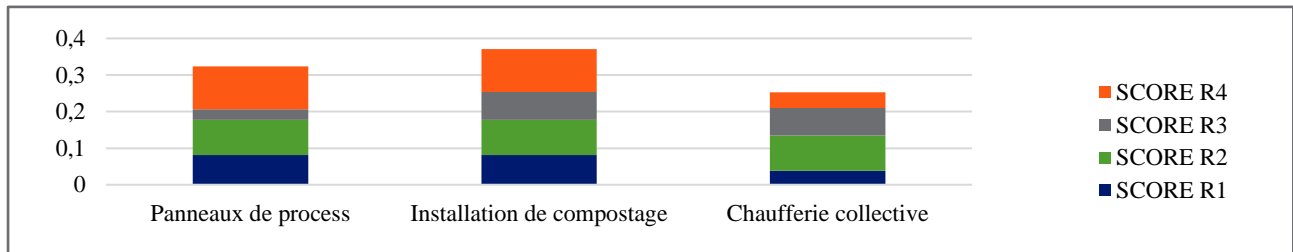


Figure 77 : Résultats de la comparaison des installations sur la dimension réglementaire

En revanche, cette solution répond mieux au principe de proximité que l'installation de panneaux de process. Enfin les trois installations se défendent équitablement sur le critère  $R_2$  — *Niveau de responsabilité* puisqu'il y a une perte de traçabilité dans la fabrication des produits (mélange de plusieurs flux de déchets de bois de plusieurs producteurs). En conséquence, on observe une rupture de la responsabilité du producteur de déchets.

### 6.1.7.3. Dimension technique et environnementale

Il est préférable que le gestionnaire du bois d'essartement privilégie l'installation de fabrication de panneaux de process pour répondre aux critères des dimensions Technique et Environnementale. En effet, cette installation permet, notamment, de mieux répondre aux problématiques de gaz à effet de serre ( $Env_2$  — *Changement climatique*), d'avoir une capacité annuelle d'absorption conséquente ( $Tech_5$  — *Capacité d'absorption annuelle de l'installation*)<sup>49</sup> et d'avoir une multiplicité des débouchés ( $Tech_4$  — *Multiplicité des produits*) dans la fabrication de produits (Figure 78). La fabrication de panneaux de particules permet de « sauvegarder » le carbone séquestré lors croissance du bois alors que les deux autres solutions en libèrent<sup>50</sup>.

Néanmoins, toutes les solutions comparées permettent de sauvegarder la ressource et de réutiliser la totalité du

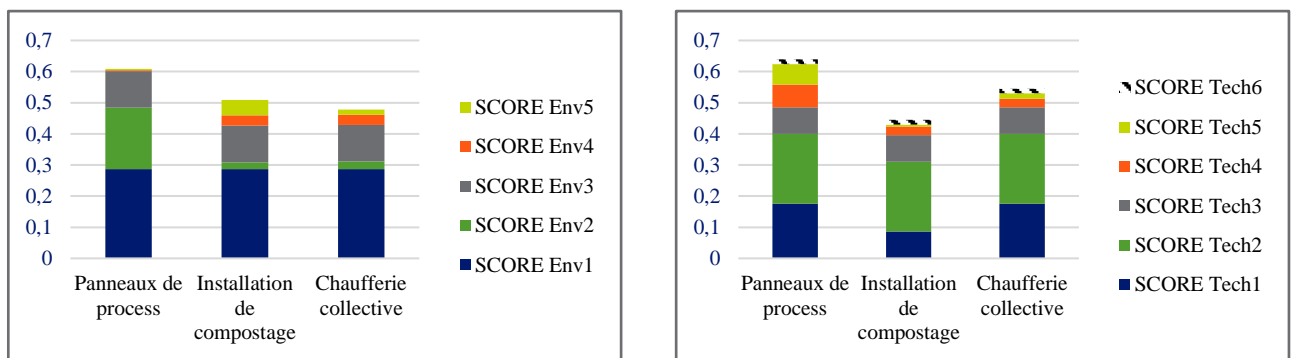


Figure 78 : Résultats de la comparaison des installations sur les dimensions environnementale (gauche) et technique (droite)

flux en remplacement d'une autre solution ( $Env_3$  — *Extraction de matières premières*). Ensuite, le critère technique capacité annuelle de l'installation ( $Tech_5$  — *Capacité d'absorption annuelle de l'installation*) et la

<sup>49</sup> Actuellement, seulement 30 % de déchets de bois sont introduits dans la fabrication de panneaux en France alors que des entreprises italiennes sont proches d'un taux de 100 %. Il y a donc une forte capacité encore non exploitée.

<sup>50</sup> A noter : la combustion du bois est dite de carbone-neutre, c'est-à-dire qu'elle ne contribue pas à l'effet de serre. A que le bois provienne de forêts durablement gérées.



multiplicité des produits possibles en sortie (*Tech<sub>4</sub> — Multiplicité des produits*) sont des critères déterminants de la note globale de l'installation pour la fabrication de panneau de process. (*Figure 78*).

#### 6.1.7.4. Dimension territoriale

La comparaison des installations sur la dimension territoriale met en évidence un net avantage pour la chaufferie collective, puis l'installation de compostage (*Figure 79*).

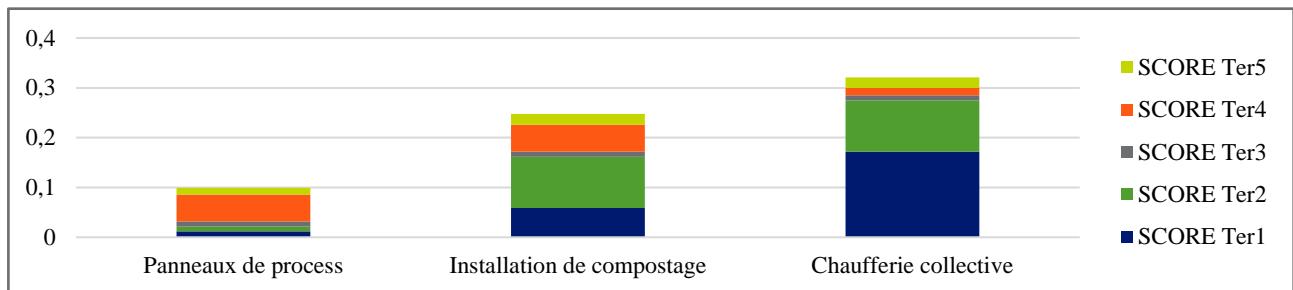


Figure 79 : Résultats de la comparaison des installations sur la dimension territoriale

Cet avantage est principalement dû aux critères *Ter<sub>1</sub> – favoriser l'économie locale* et *Ter<sub>2</sub> – Utilisation locale de la ressource*. En effet, l'installation de compostage et la chaufferie sont situées à un échelon administratif proche (local et départemental) et distribuent leurs produits respectifs dans un périmètre très localisé (matière pour les particuliers à proximité et des calories pour alimenter le réseau de chaleur de la ville). Les critères *Ter<sub>3</sub> – Capacité à transporter le déchet sur le territoire* et *Ter<sub>5</sub> – Incitations locales* ont un poids relativement faible sur les trois résultats. Le score des installations obtenues sur critère *Ter<sub>4</sub> – Emploi* montre qu'il est préférable de diriger le flux de bois vers l'installation de compostage ou vers l'installation de fabrication de panneaux de process. Les critères territoriaux font ressortir les bénéfices apportés au territoire par la gestion du déchet dans les installations considérées. En comparant le poids des critères, il est intéressant de noter que les experts de cotation ont privilégié l'emploi, l'économie locale et la réponse à un besoin en ressources pour le territoire. Les deux premiers correspondent aux enjeux généraux de développement économique et d'attractivité pour un territoire. Couplé au troisième, on retrouve les enjeux de l'économie circulaire : préserver les ressources tout en étant compétitif.

#### 6.1.8. Discussion générale sur le cas d'étude

En résumé, les résultats de l'étude de cas présentée apparaissent comme divergents sur l'ensemble des dimensions. Il est préférable d'orienter le flux de bois vers l'installation de compostage pour des aspects réglementaires alors qu'il est plus approprié de le diriger vers l'installation de fabrication de panneaux de process et la chaufferie pour des aspects économiques, environnementaux et techniques. En revanche, si l'on souhaite privilégier la dimension territoriale, il est préférable d'orienter le flux vers la chaufferie et l'installation de compostage.

Les résultats, globaux par dimension, issus de la comparaison ne permettent pas de distinguer la solution idéale sur les cinq dimensions. En revanche, la démarche discutée ci-dessus permet de mener une discussion poussée et étayée avec le gestionnaire de déchet. Dans notre cas d'étude, l'analyse met clairement en avant une des trois installations comparées en fonction de la dimension étudiée. En effet, lorsque les résultats de la comparaison sont analysés par dimension et critère par critère, une des trois voies d'orientation est souvent écartée et le choix se réduit entre deux solutions (*Tableau 128*).



Tableau 128 : Choix tranché après la discussion

DIMENSIONS	CHOIX TRANCHE ENTRE		
	INSTALLATION DE COMPOSTAGE	PANNEAUX DE PROCESS	CHAUFFERIE COLLECTIVE
REGLEMENTAIRE	X	X	
ECONOMIQUE		X	X
TERRITORIALE	X		X
ENVIRONNEMENTALE	X	X	
TECHNIQUE		X	X

Il s'agit ensuite, pour le gestionnaire opérationnel, de prendre sa décision en fonction de sa sensibilité, mais aussi à partir de l'aide des avis d'experts fournis par l'outil. Ainsi, le gestionnaire n'est plus seul à prendre une décision puisqu'il se retrouve accompagné par un panel diversifié d'experts qui a établi et validé un ordre d'importance des critères à prendre en considération et qui s'exprime à travers l'outil mis à sa disposition. Si l'on examine le *Tableau 128* ci-dessus, on peut conclure que l'installation de fabrication de panneaux de process semble être un bon compromis puisqu'elle obtient de bons résultats sur 4 des 5 dimensions prises en compte.

Par ailleurs, une étude sur les déchets de bois flottant (*Annexe 6.4*) et une seconde sur les palettes (*Annexe 6.5* et *Annexe 6.6*) ont été menées.

## 6.2. LES SEDIMENTS

Le terme « sédiment » désigne un ensemble constitué d'éléments minéraux et organiques transportés par les eaux ou le vent et qui se déposent dans un bassin de sédimentation<sup>[259]</sup>. Ces matériaux peuvent être classés selon leur nature et leur taille (*Tableau 129*)<sup>[260]</sup>.

Tableau 129 : Classification usuelle des sédiments

TYPE DE SEDIMENTS	DIAMETRE	NATURE
Sédiments fins	< 2 µm	Boues argileuses — vases
	2 µm à 63 µm	Limons
	63 µm à 2 mm	Sables (grossier et fins)
Sédiments grossiers	2 mm à 2 cm	Graviers
	2 à 20 cm	Galets et cailloux
	> 20 cm	Blocs

Le devenir des sédiments issus de dragage gérés à terre est un sujet de préoccupation important pour les gestionnaires de ports, de voies d'eau et les exploitants d'ouvrages hydroélectriques, comme EDF. Depuis la directive cadre 2008/98/CE portant sur les déchets et sa transposition en droit français en 2010, les sédiments gérés à terre sont considérés comme des déchets. Il devient nécessaire d'aider les décideurs opérationnels à choisir une bonne orientation de ces matières qui doivent être considérées comme des ressources.

### 6.2.1. Les enjeux liés aux sédiments

Les retenues hydroélectriques sont soumises à des dépôts de sédiments de quantité variable selon le bassin versant, la taille et la conception de la retenue. Pour des critères hydrauliques et d'efficacité de l'ouvrage ou d'usage du plan d'eau, il est nécessaire de gérer ces dépôts sédimentaires dans le respect de l'environnement et de la réglementation en donnant la priorité à la continuité sédimentaire, c'est-à-dire la remise en eau en aval des sédiments<sup>[259]</sup>. Dans certains cas, des impératifs liés à l'exploitation et à l'environnement peuvent contraindre les opérateurs à envisager une gestion à terre<sup>[3], [259]</sup>. Bien que les sédiments gérés à terre aient un

statut réglementaire de déchet, ils méritent d'être considérés comme une ressource alternative potentielle. Toutefois, à ce jour, il n'existe pas de filière « robuste » de valorisation à terre des sédiments fins.

### 6.2.2. Les différentes solutions de valorisation

Parmi les multiples utilisations envisageables des sédiments, sept filières ont été étudiées. Celles-ci sont détaillées dans les parties ci-dessous.

#### La filière cimentière

Le ciment est un produit servant de liant hydraulique : il s'agit d'une poudre minérale constituée à 80 % de calcaire ( $\text{CaCO}_3$ ) et à 20 % d'argile ( $\text{SiO}_2$ ) qui durcit au contact de l'eau, lui conférant ainsi une bonne résistance mécanique. Il sert essentiellement à la fabrication de béton ou de ciment.

En 2016, le SFIC (Syndicat Français de l'Industrie Cimentière) indique une production française proche de 16 millions de tonnes de ciment<sup>[261]</sup>. Cette production est assurée par 43 sites industriels (usines de fabrication de clinker et centres de broyage) appartenant aux groupes internationaux Calcia, Vicat, Lafarge Holcim, Kerneos et EQIOM.

La fabrication d'un clinker suit les étapes suivantes :

- séchage et broyage des matières premières constituant le cru,
- cuisson dans un four à 1450 °C pour obtenir le clinker,
- broyage du clinker et ajout d'additifs (laitiers, cendres volantes...) pour constituer le ciment.

Cette filière reçoit d'ores et déjà de manière courante des matériaux alternatifs, notamment des CSR (combustible solide de récupération) pour de la valorisation énergétique. La minéralogie des sédiments de barrage amène à les considérer pour une valorisation dans le cru cimentier comme matière première. La thèse de Baptiste Anger<sup>[3]</sup>, ainsi que celle d'Antoine Faure<sup>[262]</sup>, qui ont été effectuées au sein de la R&D d'EDF, démontrent que ces derniers peuvent être intégrés jusqu'à 30 % dans le cru. De plus, les cimenteries étant des installations de production (ICPE de la rubrique 2520 : fabrication de ciments, chaux, plâtres) ; elles permettraient une sortie implicite de statut de déchet. En effet, en étant incorporés dans la matière première, les sédiments subiraient un ensemble de transformations (broyage, cuisson) menant à la fabrication d'un produit.

Néanmoins, cette filière nécessite un approvisionnement régulier en sédiments. Or, ces derniers sont produits de manière ponctuelle, mais avec des tonnages importants. Une possibilité serait que les sédiments soient déposés dans des stocks tampons dans les carrières des cimentiers et utilisés au fur et à mesure, en fonction de leurs besoins<sup>[3]</sup>.

#### La filière béton

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé dans le monde. D'après l'UNICEM (Union Nationale de l'Industrie des Carrières et de Matériaux de Construction) et le SNBPE (Syndicat National de Béton Prêt à l'Emploi), sa production en France s'élève à 36,3 millions de  $\text{m}^3$  en 2016<sup>[263]</sup>. Constitué principalement de ciment (7 à 15 %), de granulats (sable et graviers, de 80 à 90 %), d'eau (120 L d'eau pour 1  $\text{m}^3$  de béton) et éventuellement d'adjuvants (moins de 5 %), le béton est un matériau facilement manipulable, qui une fois durci présente une bonne durabilité et résistance. Il existe différentes formulations en fonction de l'usage envisagé et des besoins spécifiques.

En fonction de leur nature, les sédiments de barrage contiennent une fraction sableuse plus ou moins importante qui peut être intéressante pour la confection de granulats. Néanmoins, la matière organique et l'argile contenues sont néfastes pour la production de granulats. Ainsi, seuls les sédiments les moins organiques et les plus sableux peuvent être destinés vers cette filière. Une étape de criblage est également nécessaire afin de débarrasser les sédiments de la fraction argileuse.

Pour une valorisation dans le béton, il s'agit de diriger les sédiments vers les carrières ou vers des plateformes de regroupement ou de recyclage de déchets inertes assurant la fabrication de granulats, plutôt que vers des centrales à béton. En effet, comme le montre la *Figure 80* ci-dessous, les centrales à béton sont équipées uniquement pour assurer le dosage et le malaxage des matières premières et non pour confectionner les granulats ou y recycler de la matière<sup>[264]</sup>.

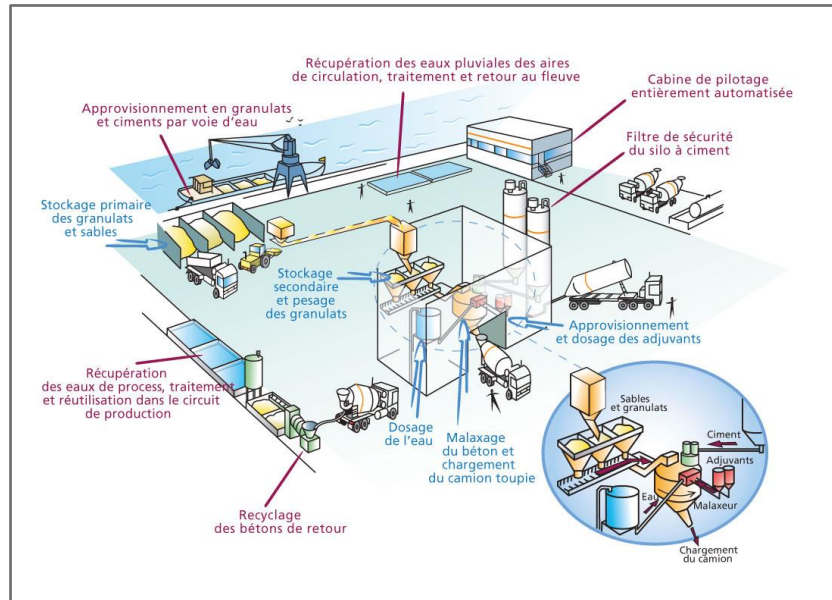


Figure 80 : Fonctionnement d'une centrale à béton

### La filière céramique (tuiles et briques)

L'industrie de la céramique en France sert principalement à la production de briques et de tuiles pour la construction de bâtiments et de logements. En 2016, la production française de terre cuite s'élève à environ 4 000 000 de tonnes, faisant ainsi de la France l'un des premiers producteurs et exportateurs dans le monde, selon la FFTB (Fédération Française des Tuiles et des Briques)<sup>[265]</sup>. Cinq groupes internationaux dominent le marché français : il s'agit des groupes Bouyer Leroux, Wienerberger, Imerys, Terreal et Monier.

Les principaux composants de la céramique sont l'argile et le sable. Après préparation (broyage, malaxage et humidification), la terre est façonnée, puis mise à sécher et finalement cuite dans un four tunnel à 1000 °C (*Figure 81*).

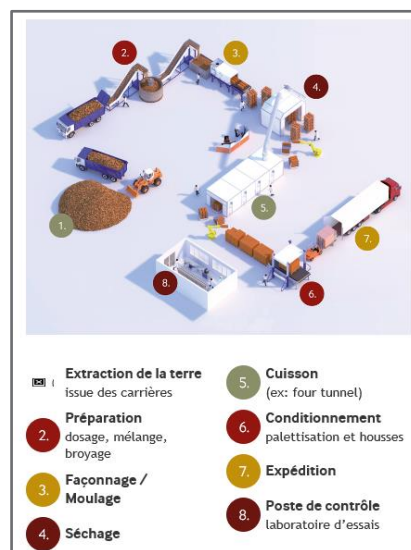


Figure 81 : Procédé de fabrication de la terre cuite

Les sédiments fins sont des matériaux argilo-limoneux qui disposent dans certains cas d'une composition minéralogique proche de celle de la matière première des céramiques : cela amène à les considérer comme de potentiels matériaux alternatifs pour cette filière. Il s'agit alors d'une valorisation matière qui mènerait à une sortie implicite de statut de déchets. En effet, de manière identique aux cimenteries, les usines de terre cuite sont des installations de production (ICPE de la rubrique 2523 : fabrication de produits céramiques et réfractaires).

L'utilisation de matériaux alternatifs en vue d'une valorisation matière est aujourd'hui peu répandue en filière céramique. Néanmoins, cela pourrait être envisagé par le biais d'essais préliminaires en laboratoire pour déterminer dans quelle mesure il serait possible d'obtenir avec les sédiments, une formulation d'un cru et d'un procédé de fabrication permettant d'obtenir un produit final avec les caractéristiques désirées<sup>[3]</sup>. Cependant, de manière analogue à la filière ciment, un flux d'entrée de sédiments régulier serait nécessaire pour les usines, d'autant plus si les procédés de fabrication doivent être adaptés au nouveau mélange. Des stocks tampons pourraient être mis à disposition par les usines pour stocker des tonnages importants de sédiments.

### La construction de sol

La terre végétale utilisée jusqu'à présent pour les aménagements d'espaces verts urbains provient de sols agricoles décapés pour des aménagements péri-urbains. Avec la reconstruction de la ville dans la ville, ces ressources sont de moins en moins disponibles et de plus en plus chères. L'emploi de sédiments permettrait à la fois de recycler un déchet et de préserver la terre végétale qui est une ressource non renouvelable<sup>[259]</sup>.

Les sédiments sont issus de phénomènes d'érosion des roches affleurantes, des sols ou des berges. Ils peuvent également être issus d'accumulation de biomasse. Les caractéristiques des sédiments sont donc proches de celles du fond géochimique local. Ainsi, du fait de leur origine, une valorisation agronomique peut être pressentie pour les sédiments<sup>[259]</sup> (Figure 82).



Figure 82 : Photographie du développement de ray-grass à partir de sédiments, travaux de Geatan Fourvel

La valorisation agronomique d'un déchet s'effectue sous deux conditions :

- il doit respecter un principe d'innocuité et ne présenter aucun danger pour la santé humaine, animale ou pour l'environnement,
- l'intérêt agronomique du déchet pour les sols et les végétaux doit être prouvé.

D'un point de vue réglementaire, la filière peut être abordée selon deux démarches :

- dans le premier cas, le déchet est transformé de sorte à être conforme à une norme. Ainsi, il acquiert le statut de produit et est mis sur le marché,
- dans le second cas, la valorisation agronomique s'effectue par le biais d'un plan d'épandage. Il n'y a donc pas de sortie de statut de déchet et le producteur reste responsable jusqu'au retour au sol.



Le cas des sédiments de barrage est délicat dans la mesure où ils ne sont cités dans aucun texte réglementaire encadrant la filière, quelle que soit la démarche adoptée.

Dans le cas de la démarche « produit », trois normes ont été étudiées : NF U 44-551 relative aux supports de culture<sup>[266]</sup>, NF U 44-051 pour les amendements organiques<sup>[267]</sup> et NF U 44-001 pour les amendements minéraux basiques<sup>[268]</sup>. Les normes NF U 44-051 et NF U 44-001 ont été écartées de l'étude dans la mesure où les sédiments ne correspondent à aucune des définitions et des spécifications présentées dans les normes citées précédemment. Cependant, les sédiments semblent être compatibles avec la définition et les spécifications de la catégorie « *substrat minéral* » de la norme « *supports de culture* ». Un « *substrat minéral* » est défini ainsi : « *mélange de matières minérales pouvant intégrer des matières organiques et/ou des matières synthétiques* ». Néanmoins, la norme renvoie vers la définition des « *matières minérales* », dans laquelle les sédiments ne sont pas cités. En conséquence, les sédiments ne peuvent pas constituer de support de culture normé, du moins en France.

Dans le cas d'un plan d'épandage, deux arrêtés ministériels encadrent cette démarche : l'arrêté du 08/01/1998 relatif à l'épandage des boues de STEP<sup>[269]</sup> et l'arrêté du 02/02/1998 relatif aux prélèvements et à la consommation d'eau ainsi qu'aux émissions de toute nature des ICPE soumises à autorisation<sup>[270]</sup>. Le premier arrêté limite la quantité de boues à épandre à 3 kg de matières sèches par m<sup>2</sup> sur une période de 10 ans, ne permettant donc pas la valorisation de tonnages importants. Il est également intéressant de noter que les sédiments sont de nature bien différente aux boues de STEP. Ils sont en effet peu organiques et contiennent peu de matières fertilisantes (N,P,K), par opposition aux boues de STEP. Ces différences rendent les prescriptions définies par l'arrêté du 08/01/1998 peu compatibles avec le cas des sédiments. L'arrêté du 02/02/1998 a également été étudié, bien que les retenues hydroélectriques ne soient pas des ICPE soumises à autorisation. Ce dernier définit les mêmes seuils à respecter et les mêmes prescriptions (notamment concernant la quantité de boues à épandre) que l'arrêté relatif aux boues de STEP.

### La technique routière

La structure d'une route permet d'assurer une bonne stabilité mécanique de cette dernière, notamment face aux sollicitations diverses liées au trafic routier et à l'environnement. Comme indiqué dans la *Figure 83*, une route est constituée de plusieurs couches : plus la couche est proche de la surface, plus celle-ci devra présenter une résistance mécanique importante.

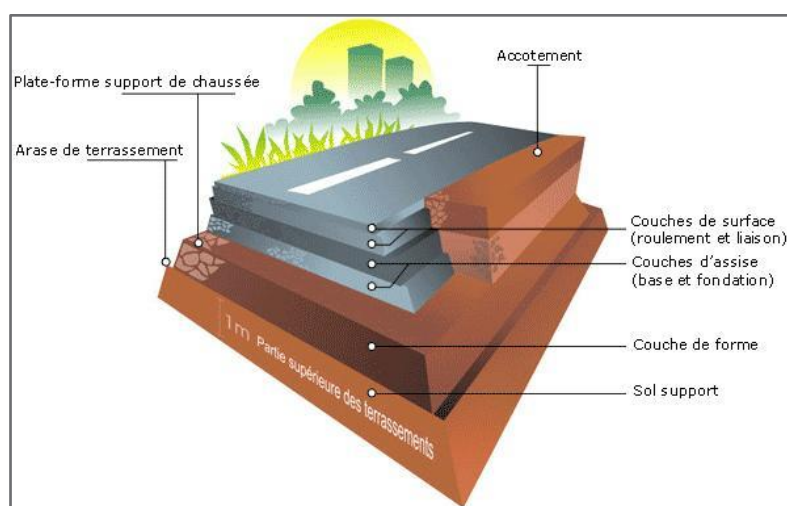


Figure 83 : Schéma de la structure d'une route

La construction d'une route nécessite une consommation importante de matériaux. Selon l'Union Nationale des Producteurs de Granulats (UNPG), environ 30 000 tonnes de granulats sont nécessaires pour construire un kilomètre d'autoroute. Ainsi, face à l'éventuel manque de granulats dans les années à venir, la filière a recours

à l'emploi de matériaux recyclés ou issus d'une valorisation matière. Le choix des matériaux s'appuie sur les prescriptions techniques du Guide des Terrassements Routiers (GTR) publié par le SETRA et le LCPC en 1992, puis réédité en 2000, qui encadre la construction de remblais et de couches de forme (couche la plus profonde de la structure routière)<sup>[271]</sup>. Ce guide technique classe notamment les matériaux en fonction de leur granulométrie et de leurs caractéristiques géotechniques. À partir de cette classification, les sédiments de barrage peuvent être assimilés à un sol de classe A. Ainsi, du fait de leur granulométrie fine, de leur teneur en matière organique souvent élevée et de leur humidité importante, les sédiments de barrage disposent de propriétés mécaniques médiocres rendant leur valorisation en techniques routières difficile. Un traitement à la chaux ou au liant hydraulique serait donc préconisé pour améliorer la tenue de la couche de forme ou du remblai : ces traitements restent néanmoins onéreux.

Un guide environnemental sur l'acceptabilité des matériaux alternatifs en techniques routières a été publié par le SETRA et sert de référence pour une évaluation environnementale de ces derniers. Aujourd'hui, un guide environnemental sur l'acceptabilité des sédiments de barrage est également en cours de rédaction. Néanmoins, l'utilisation des sédiments dans cette filière est encore peu développée. Les plateformes de recyclage de déchets inertes en granulats pour la valorisation en techniques routières sont souvent réticentes à l'utilisation de ce matériau, du fait de la méconnaissance qu'elles en ont et de ses propriétés jugées peu adaptées à la filière.

### **Le comblement de carrières**

Une carrière est le lieu dans lequel sont extraits des matériaux de construction tels que le sable et les granulats. L'exploitation de ces carrières donne lieu à des excavations sur le site, que l'exploitant se doit de remettre en état (*Figure 84*). L'article 12.2 de l'arrêté du 22/09/1994 relatif aux exploitations de carrières et aux installations de premier traitement des matériaux de carrières définit les prescriptions minimales pour la remise en état d'un site : il s'agit pour l'exploitant de sécuriser le lieu et d'assurer une insertion satisfaisante dans le paysage<sup>[272]</sup>. L'aménagement de la carrière est un prolongement de la remise en état et consiste en la création d'infrastructures donnant au lieu une affectation nouvelle (création de bases de loisirs...).



*Figure 84 : Comblement de carrière près de Nantes (44 000)*

Un apport important de matériaux est donc nécessaire pour un remblaiement des excavations. Ces matériaux, internes ou externes au site, doivent obligatoirement être inertes afin d'éviter toute contamination souterraine. L'article 12.3 de l'arrêté du 22/09/1994 renvoie donc vers les seuils définis par l'arrêté du 12/12/2014 relatif à l'acceptation des déchets en Installations de Stockage de Déchets Inertes (ISDI)<sup>[273]</sup>. Néanmoins, outre le caractère inerte du déchet et son caractère pelletable (au moins 30 % de siccité), la réglementation ne définit aucun autre critère (caractéristiques géotechniques notamment) pour l'acceptation des déchets en remblaiement de carrières. Ainsi, du fait de ce manque d'encadrement, les carrières peuvent accepter tout type de matériaux à partir du moment où ils sont inertes et pelletables. Les carrières interrogées lors d'entretiens téléphoniques considèrent l'utilisation de sédiments inertes dans cette filière comme envisageable, malgré leur granulométrie très fine. En effet, le volume à combler étant particulièrement important, cet apport de matériaux

fins serait négligeable en comparaison à la quantité annuelle nécessaire de matériaux et n'impacterait pas la stabilité du remblai. En ce qui concerne la siccité du matériau en entrée des installations, cela dépend des carriers. En effet, certaines carrières sont accessibles par barge : les sédiments pourraient donc être transportés par voie fluviale et subir une première déshydratation directement dans les barges, où l'eau serait pompée. D'autres carriers disposent de terrains suffisamment importants pour y envisager le dépôt des sédiments pour du ressuyage. Enfin, d'autres carriers affirment ne pas avoir suffisamment de surface pour égoutter les matériaux et exigent que ces derniers soient pelletables dès l'entrée de l'installation.

D'un point de vue réglementaire, le remblaiement de carrière est considéré comme une opération de valorisation. En effet, la décision de la Commission Européenne du 18/11/2011 définit le remblayage comme « *une opération de valorisation par laquelle des déchets appropriés sont utilisés, en remplacement de matières qui ne sont pas des déchets, à des fins de remise en état pour combler des trous d'excavation ou pour des travaux d'aménagement paysager* ». La Loi de Transition Énergétique pour la Croissance Verte (LTECV) précise que lorsque la carrière est en exploitation, le carrier peut recevoir une contrepartie financière à l'utilisation de déchets inertes (article 94), ce qui n'est pas le cas si la carrière est fermée. Néanmoins, la carrière fermée peut changer de statut et devenir une ISDI : l'exploitant peut alors de nouveau recevoir une contrepartie financière, mais il s'agit alors d'une opération d'élimination.

### **Le Slufter près de Rotterdam**

Le Slufter, situé près du port de Rotterdam, est une zone destinée à stocker des boues contaminées ou non. Il a été construit en 1985 et a une superficie de 260 ha.



*Figure 85 : Photographie du Slufter près de Rotterdam*

La digue circulaire autour du dépôt est à 24 m de hauteur et la profondeur du dépôt est de 28 m sous le niveau de la mer. Il est prévu que des boues soient stockées dans le Slufter jusqu'à 2025. En 2014, la capacité restante est estimée à 50 millions de m<sup>3</sup>. Cette opération est considérée comme une élimination. Cette filière à l'avantage d'être connectée aux réseaux de canaux fluviaux reliant la France et les Pays-Bas. Ainsi, il est facile de transporter les sédiments par les voies navigables jusqu'au Slufter, mais le transport est complexifié par la réglementation des déchets transfrontaliers.



### 6.2.3. Conclusion sur les filières

L'application de la démarche CLE décrite dans l'introduction générale et plus particulièrement la partie *Connaitre* a permis d'identifier différentes filières de valorisation (présentées dans les parties ci-dessus). La *Figure 86* résume les différentes possibilités de gestion à terre des sédiments qui ont été étudiées dans le cadre de nos travaux.

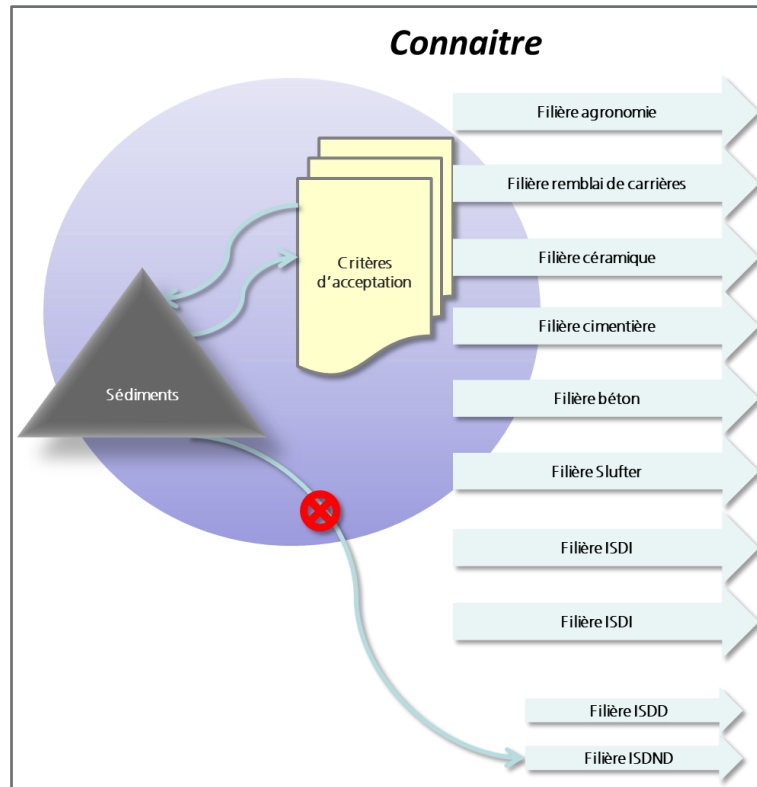


Figure 86 : Filières retenues et non retenues pour la valorisation des sédiments

### 6.2.4. Étude de cas portant sur les sédiments

#### 6.2.4.1. Mise en contexte

EDF exploite une large part des installations du parc hydraulique français et doit gérer le transit sédimentaire. En particulier, le Plan de Gestion Pluriannuel des Opérations de Dragage 2015-2025 (PGPOD) du Rhin fixe les étapes à réaliser pour l'évaluation du besoin de dragage et la valorisation des sédiments<sup>[260]</sup>. Nous proposons ici d'appliquer notre méthodologie au cas des sédiments de l'écluse de Strasbourg pour le chantier de 2018. Au niveau de l'écluse de Strasbourg, 12 500 tonnes de sédiments, considérés comme inertes, doivent ont été géré à terre.

Nous proposons d'étudier et d'évaluer les voies de gestion ci-dessous avec notre outil (*Figure 87*) :

- V<sub>1</sub> – Valorisation en filière céramique,
- V<sub>2</sub> – Valorisation en technique routière,
- V<sub>3</sub> – Valorisation agronomique,
- V<sub>4</sub> – Slufter près de Rotterdam,
- V<sub>5</sub> – Élimination en ISDI.

Ces installations sont détaillées en *Annexe 6.7*.

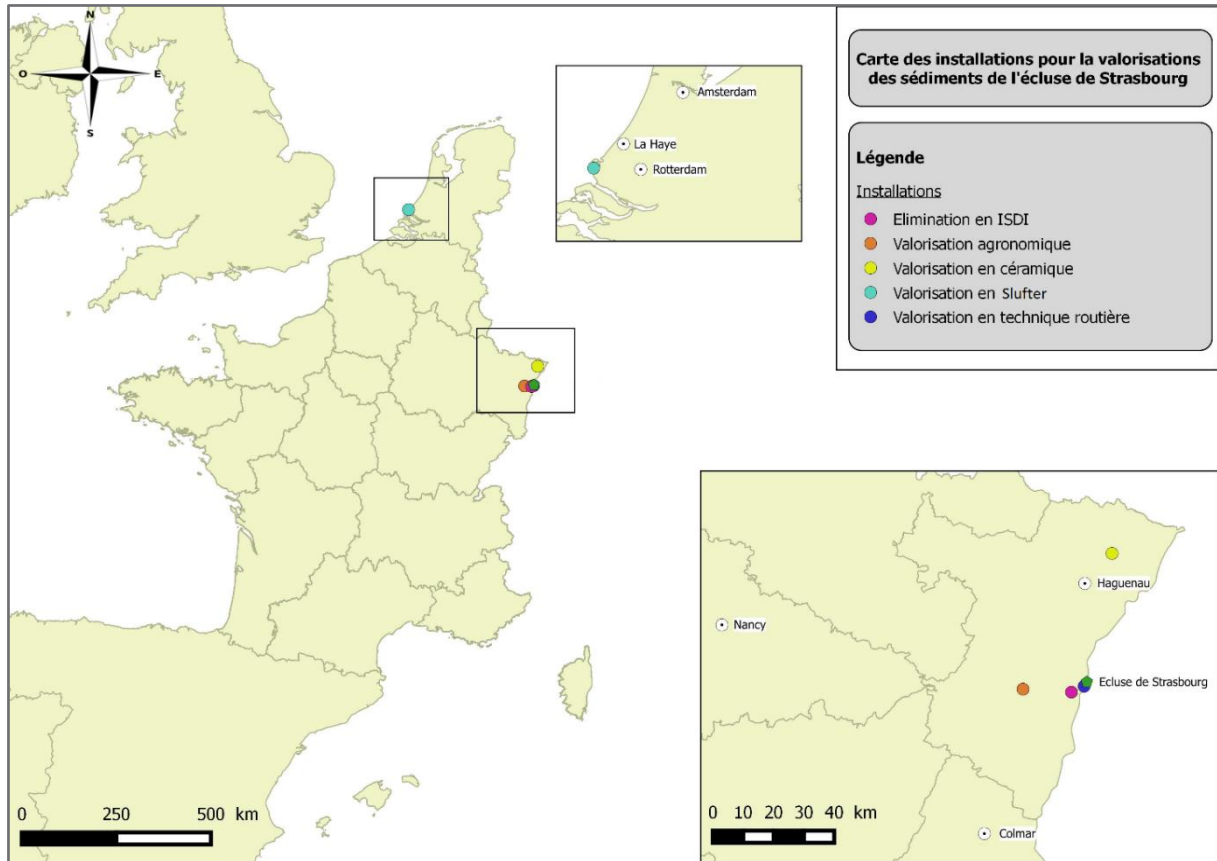


Figure 87 : Carte des installations retenues pour la gestion à terre des sédiments

Des études dédiées menées récemment sur la valorisation des sédiments des ouvrages hydro-électriques ont montré que les filières de valorisation  $V_1$  à  $V_3$  peuvent accepter une intégration de sédiments en substitution de matières premières. Les gestionnaires de sédiments du site sont alors confrontés au questionnaire suivant :

« Comment arbitrer entre les différentes voies de gestion, présentées ci-dessus, pour le devenir des sédiments d'une écluse sur le Rhin ? »

#### 6.2.4.2. Résultats

Le premier résultat préliminaire consiste à identifier et à localiser les installations correspondantes aux voies de gestion citées précédemment (Tableau 130).

Tableau 130. Identification et localisation des installations de gestion de déchets.

$V_1$ – VALORISATION EN CERAMIQUE	$V_2$ – VALORISATION EN TECHNIQUE ROUTIERE	$V_3$ – VALORISATION AGRONOMIQUE	$V_4$ – ELIMINATION DANS LE SLUFTER	$V_5$ – ÉLIMINATION EN ISDI
Usine de Betschdorf	Plateforme S.A.R.M	Plateforme Denni Legoll	Slufter	ISDI de Lingenheld environnement
58,4 km	1,5 km	30 km	660 km	21,2 km

Les installations présentées dans le tableau ci-dessus proviennent d'une recherche plus approfondie des installations liées aux filières présentées précédemment (cf. Chapitre 6 - §6.2.2). En outre, nos travaux ont conduit à créer des bases de données géoréférencées des installations. Elles ont été établies à partir des sources suivantes (Tableau 131) :

Tableau 131 : Les bases de données créées pour les filières de valorisation des sédiments

FILIERES						
AGRONOMIE	REMBLAI DE CARRIERE	CERAMIQUE	ISDD	ISDND	CIMENTERIE	ISDI
SINOE – Installation de compostage	BRGM – Carrières en activités	ASTREE – NAF2332Z	MEED - ISDD	SINOE – ISDND	ASTREE – NAF 2351Z	ICPE – 2760
	BRGM – Carrières fermées	BDD – CTMNC		EauFrance – ISDND	BRGM – Cimenterie	SINOE – ISDI
		BDD – Travaux de Nada AISSAIMI			Global Cement Directory (2012) – Cimenterie	DDT – ISDI
					BDD – Travaux de Nada AISSAIMI	

Dans le cas de la gestion à terre des sédiments de l'écluse de Strasbourg, les filières ISDD et ISDND ne sont pas présentées dans ce manuscrit puisqu'elles ne répondent aux objectifs de valorisation de l'entreprise. Ensuite, dans le cas particulier du département de l'Alsace, il est aujourd'hui interdit de faire du remblai de carrière en eau. Enfin, dans le cas d'étude présenté ici, nous n'avons pas examiné d'installation provenant de la filière cimentière puisque nous tenions à comparer deux filières d'élimination, mais avec des caractéristiques opposées : l'une est dans un rayon de 30 km (l'ISDI située en France) alors que l'autre est à plus de 600 km (le Slufter qui se trouve aux Pays-Bas).

C'est une comparaison de deux installations d'une même catégorie sur l'échelle de la hiérarchie de gestion des déchets (ils s'agit de deux filières d'éliminations), mais avec des caractéristiques différentes. Cette configuration engendre forcément des similitudes aux niveaux de certains critères, mais aussi de nombreuses différences au niveaux de la distance, des coûts, du réchauffement climatique, des caractéristiques techniques et des aspects locaux. Cette démarche nous permettra de vérifier le bon fonctionnement des critères sur chacune des dimensions et de constater leur influence sur les résultats. La *Figure 88* ci-dessous montre les résultats globaux par dimension des cinq installations comparées<sup>51</sup>.

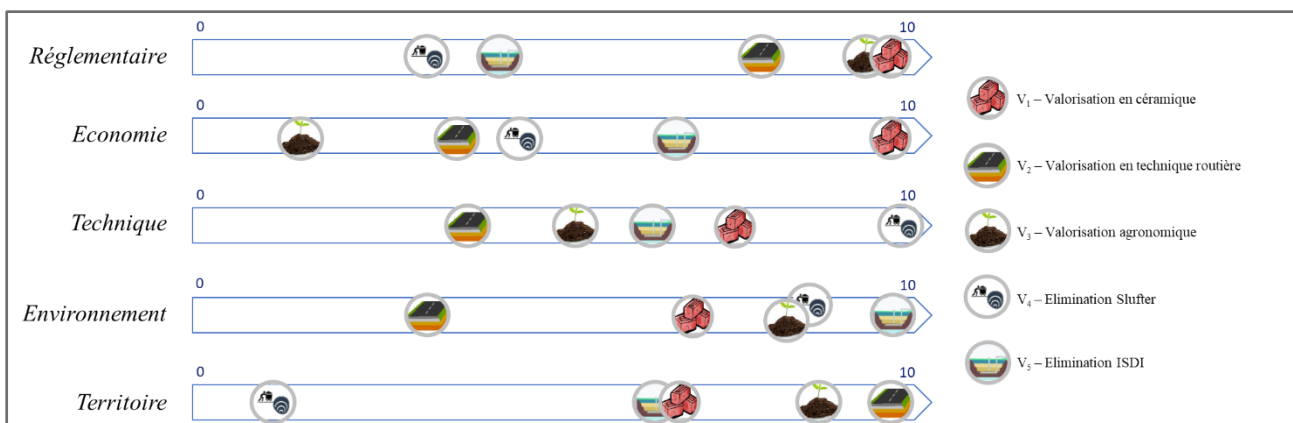


Figure 88 : Résultats de la comparaison des installations sur les 5 dimensions

<sup>51</sup> Ce mode de représentation permet de montrer l'éloignement des installations par rapport à celle qui a obtenu la meilleure note sur la dimension. En outre, cela ne signifie pas que l'installation a eu la note de 10 sur 10 sur la dimension, mais simplement qu'elle est la meilleure. Les autres installations sont comparées (via leur note) relativement par rapport à celle-ci.

Nous remarquons aisément qu'il n'y a pas une solution idéale, puisque chacune des installations a des forces et des faiblesses sur chacune des dimensions. En effet, il en ressort qu'il est préférable de diriger le flux de sédiments vers les installations de valorisation  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$  d'un point de vue réglementaire, mais plutôt vers les installations  $V_1$ ,  $V_4$  et  $V_5$  pour des aspects techniques. En revanche, il est plus avisé de valoriser les sédiments vers l'installation de valorisation céramique ( $V_1$ ) pour des aspects économiques alors que les installations  $V_2$  et  $V_3$  se démarquent sur la dimension territoriale. Pour finir, il est évident que l'installation  $V_4$  ne permet pas de répondre aux enjeux des dimensions réglementaire et territoriale.

Ces résultats globaux permettent une première approche, mais ne doivent pas occulter une analyse approfondie par dimension. En effet, une analyse complète est nécessaire pour repérer les critères importants intervenus dans le calcul de la note globale, de vérifier si ces mêmes critères sont définis par un poids fort ou non et d'analyser la sensibilité des résultats en fonction du jeu de données ou des hypothèses choisies.

## 6.2.5. Présentation des résultats et discussion

### 6.2.5.1. Dimension réglementaire

Le critère le plus important de la dimension réglementaire est le critère  $R_1$  — *Respect de la hiérarchie de gestion des déchets*. Ainsi, les solutions de valorisation  $V_1$ ,  $V_2$  et  $V_3$  sont les voies d'orientation à privilégier

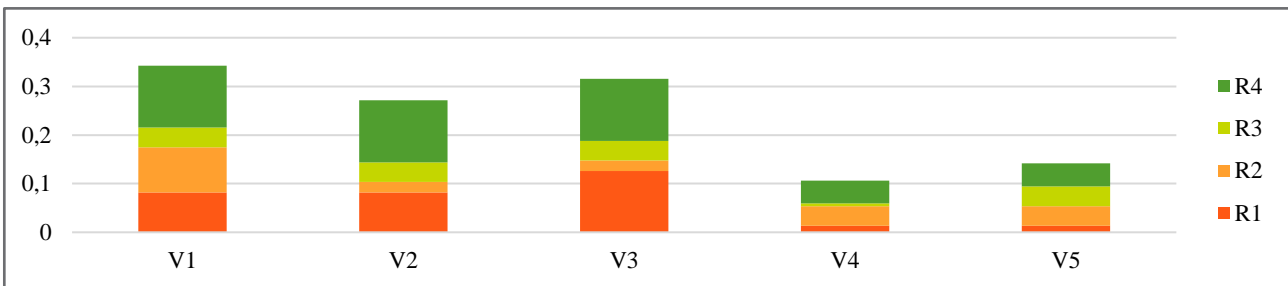


Figure 89 : Résultats de la comparaison des installations sur la dimension réglementaire

(Figure 89). Les voies d'orientation ( $V_4$  et  $V_5$ ) ont la même finalité (l'élimination), mais le Sfluter à Rotterdam se situe à plus de 600 kilomètres, ce qui explique l'écart sur l'histogramme. De plus, les deux installations d'élimination ne permettent pas de répondre aux objectifs de valorisation de l'entreprise.

### 6.2.5.2. Dimension économique

D'un point de vue économique, deux installations sortent du lot : l'installation  $V_1$  et  $V_5$  (Figure 90).

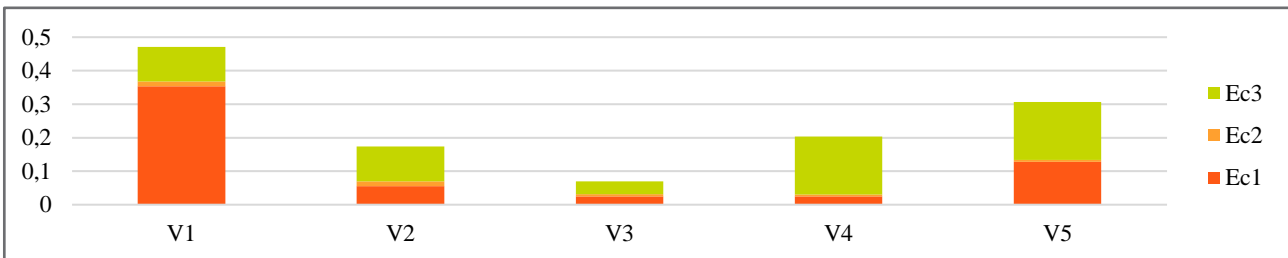


Figure 90 : Résultats de la comparaison des installations sur la dimension économique

La première est la plus intéressante, dans la mesure où elle achèterait potentiellement les sédiments. Pour les sédiments de barrage, les interviews ont montré que ces derniers pouvaient être valorisés à un coût nul ou vendu, c'est-à-dire un gain pour l'entreprise. En effet, l'installation interrogée (filère céramique tuile brique) propose d'acheter les sédiments à 20 euros la tonne ou à 0 euro la tonne en fonction de leur qualité (Tableau 132). Dans les deux cas, c'est un avantage économique certain par rapport aux autres installations puisqu'il s'agirait d'une opération négative pour l'entreprise (environ -20 € la tonne).

D'un point de vue technique, il faudrait néanmoins séparer les sédiments fins des grossiers via un procédé cyclonique avec un coût estimé à 10 euros la tonne. En conséquence, le coût final dont devra s'acquitter le gestionnaire de déchets reste inférieur aux autres solutions.

Tableau 132 : Caractéristiques des scénarios économiques pour la valorisation des sédiments

SCÉNARIOS	QUALITE DES SEDIMENTS	COUTS DE VALORISATION	COUT DE SEPARATION	COUT TOTAL
Scénarios 1	Sédiments de très bonne qualité	+ 20 € la tonne	10 €/tonne	+ 10 euros la tonne
Scénarios 2	Sédiments de qualité moyenne	+ 5 € la tonne		- 5 euros la tonne
Scénarios 3	Sédiments de mauvaise qualité	0 € la tonne		- 10 euros la tonne

Les installations V<sub>3</sub>, V<sub>4</sub> et V<sub>5</sub> ne disposent pas d'autres installations à proximité, ce qui explique l'absence de score sur le critère Ec<sub>2</sub> — *Intensité concurrentielle*. L'installation V<sub>3</sub> (valorisation agronomique) est le plus mauvais des scénarios. En effet, le coût d'entrée dans la filière serait entre 25 et 50 euros la tonne (suivant la siccité) et c'est également la seule installation en Alsace (que nous avons identifié) qui est capable de valoriser des sédiments dans la filière agronomique. Cependant, cette filière est trop petite pour pouvoir traiter l'intégralité du flux (Ec<sub>3</sub> – *Intensité de la demande*) et le décideur opérationnel serait alors dans l'obligation de trouver une seconde filière pour valoriser les sédiments restants.

### 6.2.5.3. Dimension technique

D'un point de vue technique (Figure 91), c'est le critère Tec<sub>2</sub> — *Adéquation du déchet en entrée d'installation* qui a une grande importance dans les résultats finaux. En conséquence, l'installation V<sub>2</sub> est la moins conforme d'un point de vue technique pour les sédiments, dans la mesure où ces derniers sont peu adaptés à une valorisation en technique routière.

L'installation V<sub>4</sub> se démarque des autres installations, dans la mesure où elle a déjà reçu des sédiments et que c'est une installation bien établie. Ainsi, l'élimination en Slufter (V<sub>4</sub>) est bien notée sur cette dimension du fait de bon score sur les critères Tec<sub>1</sub> – *Pérennité de l'installation*, Tec<sub>2</sub> – *Adéquation du déchet en entrée d'installation*, Tec<sub>5</sub> – *Capacité absorption annuelle de l'installation*, et Tec<sub>6</sub> – *Flexibilité de l'installation*.

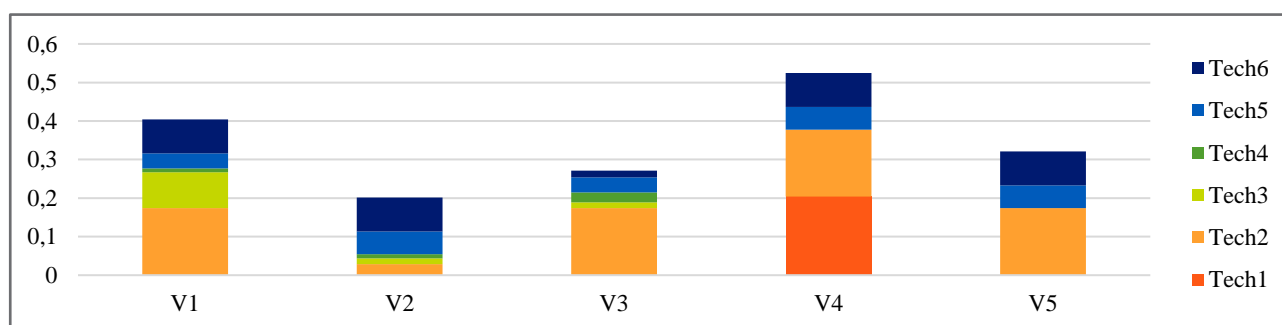


Figure 91 : Résultats de la comparaison des installations sur la dimension technique

L'installation V<sub>3</sub> (valorisation agronomique) en France, serait certainement l'une voire la meilleure des solutions, si les sédiments étaient référencés dans les normes produits (Tec<sub>3</sub> – *Adéquation du produit dans une filière*). De plus cette installation est pénalisée sur le critère Tec<sub>1</sub> — *Pérennité de l'installation*, car il n'existe pas aujourd'hui d'installation valorisant les sédiments en agronomie depuis plusieurs années.

Le Tableau 133 ci-dessous regroupe quelques données et hypothèses utilisées pour évaluer la filière céramique sur les critères techniques.

Tableau 133 : Les hypothèses utilisées pour évaluer l'installation V<sub>1</sub> — Céramique sur les critères techniques

V <sub>1</sub> —CERAMIQUE		
	DONNEES ET HYPOTHESES	NIVEAU SUR L'ECHELLE D'EVALUATION DU CRITERE
Tec <sub>1</sub> Pérennité de l'installation	Pas de valorisation matière à ce jour.	-
Tec <sub>2</sub> Adéquation du déchet en entrée d'installation	Pas de norme établissant les critères techniques du matériau en entrée d'installation, mais il est nécessaire de faire des essais en laboratoire pour la formulation	Plutôt Oui
Tec <sub>3</sub> Adéquation du produit dans une filière	Toute la production de l'installation est normée. À partir du moment où l'installation accepte le déchet, elle pourra produire un produit normé.	Oui
Tec <sub>4</sub> Multiplicité des produits	Que des briques	1
Tec <sub>5</sub> Capacité d'absorption annuelle de l'installation	Le besoin en matières premières est de 20 000 tonnes par mois. Au mieux, 10 % de la matière première pourrait être remplacée par du sédiment, soit 2000 tonnes par mois. L'installation peut néanmoins accepter un stockage tampon de 10 000 tonnes.	100 %
Tec <sub>6</sub> Flexibilité de l'installation	Lieu de de stockage sur le site.	Oui

#### 6.2.5.4. Dimension environnementale

Dans le cas où une installation est considérée comme néfaste pour l'environnement, elle est sanctionnée par les autorités d'inspection des installations classées pour l'environnement par une mise en demeure. D'un point de vue environnemental (Figure 92), le critère *Env<sub>1</sub> - Impacts environnementaux réglementés* a le plus d'importance d'après les avis d'expert. Ainsi, l'installation V<sub>2</sub> est donc l'installation à éviter sur cette dimension puisqu'elle a déjà été mise en demeure pour une problématique liée à l'environnement.

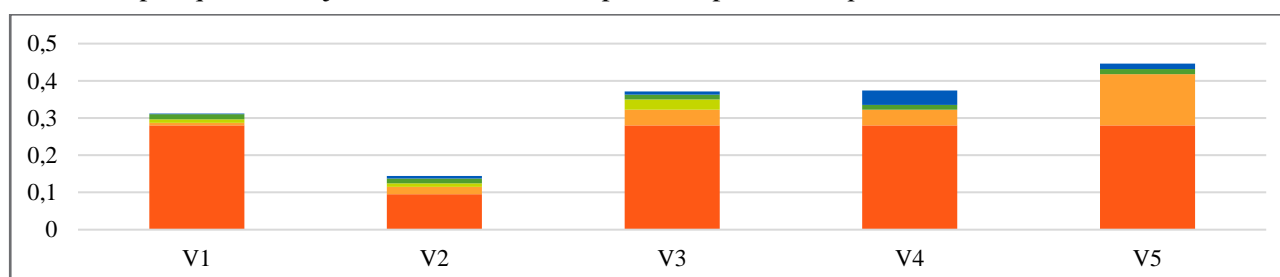


Figure 92 : Résultats de la comparaison des installations sur la dimension environnementale

Les résultats sur le critère *Env<sub>2</sub> - Impact sur le changement climatique*, quantifié par le biais d'une Analyse de Cycle de Vie (ACV) sur le logiciel SimaPro, montrent que les voies V<sub>3</sub> et V<sub>5</sub> sont à privilégier. Le Tableau 134 ci-dessous regroupe les principales données et hypothèses choisies pour comparer les installations sur le critère *Env<sub>2</sub> — Impact sur le changement climatique*.

Tableau 134 : Les données utilisées pour comparer les installations sur le critère *Env<sub>2</sub>*

ENV2 — IMPACT SUR LE CHANGEMENT CLIMATIQUE						
UNITE FONCTIONNELLE	CATEGORIE D'IMPACT	IMPACT TOTAL (KG CO <sub>2</sub> EQ)	IMPACT PRODUCTION (KG CO <sub>2</sub> EQ)	IMPACT TRANSPORT (KG CO <sub>2</sub> EQ)	IMPACT SPÉCIFIQUE (MANUTENTION ÉLIMINATION)	
V <sub>1</sub>	Valoriser 1 t de sédiments dans cette installation.	IPCC GWP 100a (en kg CO <sub>2</sub> eq)	1803,37	1798,34	5,03	-
V <sub>2</sub>			87,70	84,68	2,93	-
V <sub>3</sub>			22,27	4,68	8,80	-
V <sub>4</sub>			23,75	-	19,8	2,61
V <sub>5</sub>			4,33	-	1,72	2,61

V<sub>1</sub> – Valorisation en céramique ; V<sub>2</sub> – Valorisation en technique routière ; V<sub>3</sub> – Valorisation en agronomie ; V<sub>4</sub> – Élimination en Slufter ; V<sub>5</sub> – Élimination en ISDI

### 6.2.5.5. Dimension territoriale

La Figure 93 montre que les installations V<sub>2</sub> et V<sub>3</sub> répondent mieux aux critères de la dimension territoriale.

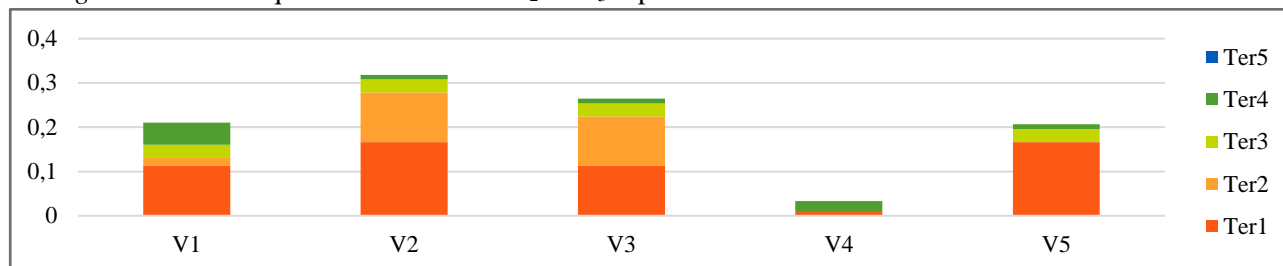


Figure 93 : Résultats de la comparaison des installations sur la dimension territoriale

En effet, les installations sont dans le même périmètre administratif que l'écluse de Strasbourg et valorisent localement la ressource. En conséquence, leurs scores sur les critères *Ter*<sub>1</sub> — Favoriser l'économie locale et *Ter*<sub>2</sub> — Utilisation locale de la ressource sont plus élevés que les autres installations. À l'opposé, l'installation V<sub>4</sub> qui permet d'éliminer les sédiments dans le Slufter aux Pays-Bas dispose de la note la plus basse d'un point de vue territorial.

### 6.2.6. Discussion générale sur le cas d'étude

Aucune des installations n'est parfaite sur l'ensemble des dimensions. Globalement, les installations d'élimination (V<sub>4</sub> et V<sub>5</sub>) sont davantage à privilégier d'un point de vue technique puisque celles-ci sont établies depuis quelques années et habituées à traiter des sédiments. En revanche, toutes solutions de valorisation V<sub>1</sub> (céramique) et V<sub>3</sub> (agronomie) sont à développer. Par ailleurs, la solution V<sub>3</sub> fait l'objet d'essais industriels. Ainsi, on peut imaginer que dans quelques années ces installations et plus globalement ces filières seront mieux notées et notamment sur les critères *Tec*<sub>1</sub> — Pérennité de l'installation, *Tec*<sub>2</sub> — Adéquation du déchet dans l'installation et *Tec*<sub>3</sub> — Adéquation du produit dans une filière. De plus les installations de valorisation et les producteurs de sédiments auront eu le temps d'organiser et de mettre en place des solutions pour répondre aux fluctuations de la quantité de la production de sédiments.

Aujourd'hui, l'outil montre que ces voies de valorisation ne sont pas robustes et pérennes, mais lors des interviews auprès des installations, la démarche montre que les entreprises sont intéressées et prêtes à essayer de valoriser les sédiments. Ce sont donc des voies de valorisation que la R&D d'EDF doit continuer à instruire.

Au-delà des résultats présentés, le cas d'étude montre que la méthodologie de comparaison développée durant les travaux de thèse est fonctionnelle et facile à prendre en main. En effet, plusieurs études complémentaires ont été effectuées sur les sédiments de l'écluse de Strasbourg et du barrage d'Escaumels. Celles-ci ont été menées par Nada AISSAMI, élève ingénieur de l'INSA de Lyon, en stage à la R&D d'EDF et intégrée à l'équipe déchets. Elle a donc été la première utilisatrice de l'outil à ne pas avoir participé à sa construction.

Par ailleurs, nos résultats pour le cas des sédiments ont été présentés à une trentaine de cadres de EDF via deux visio-conférences, ils ont été très intéressés aussi bien pour les membres représentant l'ingénierie, les exploitants, les responsables environnement et les acheteurs.

## 6.3. LES GRANULATS DE LA DECONSTRUCTION

Les déchets issus du BTP représentent la part la plus importante (avec les déchets de l'agriculture) des déchets générés en France : 247 MT/an en 2012 (cf. §Chapitre 1). Au niveau d'EDF SA, la part des déchets du BTP enregistrée dans OGIDE croît chaque année, pour atteindre 112 000 t en 2017 soit 70 % de la masse totale des déchets déclarés dans la base nationale.



### 6.3.1. Les enjeux liés à la gestion des déchets du BTP.

Les chantiers de travaux publics produisent plusieurs catégories de déchets qu'il faut isoler et traiter séparément :

- déchets inertes recyclables,
- déchets inertes non recyclables, mais susceptibles d'aller en ISDI,
- déchets dangereux (déchets revêtus par des substances dangereuses contenant du plomb ou de l'amiante, déchet d'amiante libre, bois traités à la créosote, DEEE (Déchets d'Équipements Electriques et Electroniques), déchets provenant d'étanchéités à base de goudron, etc.),
- éléments recyclables (métaux, bois non traités, emballages, éléments contenant du plâtre pouvant être démonté et séparé, plastique, etc.).

Le volume le plus important concerne les déchets inertes et recyclables. Il est principalement constitué de gravats de béton qu'il est possible de concasser en granulats recyclés. Dans le cadre de nos travaux, nous proposons de nous focaliser sur ces déchets.

### 6.3.2. Les granulats

Les granulats sont un ensemble de grains de dimensions comprises entre 0 et 125 mm destinés notamment à la confection des mortiers, des bétons, des couches de fondation, de base, de liaison et de roulement des chaussées, des assises et ballasts de voies ferrées, des remblais<sup>[274]</sup>. La France est l'un des grands producteurs (et consommateurs) de granulats en Europe. Le *Tableau 135* ci-dessous montre la production nationale de granulats en fonction de leur origine<sup>[263]</sup>.

*Tableau 135 : Production nationale de granulats en 2016 en France adaptée*

	2015 (EN MILLIONS DE TONNES)	2016 (EN MILLIONS DE TONNES)
<b>Roches meubles</b>	<b>117,9</b>	<b>120,4</b>
Alluvionnaires	94,2	96,0
Granulats marins	6,5	6,0
Autres sables	17,2	18,4
<b>Roches massives</b>	<b>184,4</b>	<b>184</b>
Roches calcaires	90,5	90,8
Roches éruptives	93,9	93,2
<b>Granulats de recyclage</b>	<b>25,3</b>	<b>25,7</b>
Issus de la démolition <sup>(1)</sup>	20,9	21,4
Artificiels**	4,4	4,3
<b>Total</b>	<b>327,6</b>	<b>330,1</b>

On remarque que la production de granulats se fait principalement à partir de granulats naturels puis à partir de roches massives et de roches meubles. Sur un total de 330,1 millions de tonnes de granulats produits en 2016, seulement 27,5 millions de tonnes proviennent du recyclage soit, ici 12 % de la production totale de granulats.

### 6.3.3. L'utilisation et la consommation des granulats

La *Figure 95* présente le taux d'utilisation des granulats par secteur d'activités<sup>[263]</sup>. Nous pouvons voir qu'ils sont essentiellement utilisés dans les travaux de génie civil et pour des travaux de terrassement de réseaux routiers et ferroviaires. Le second principal usage des granulats est le bâtiment avec la fabrication de béton prêt à l'emploi (21 %) et de béton de chantier (7 %). Au total, ce sont 111 millions de tonnes de granulats qui sont utilisées pour le béton. Enfin, les granulats sont minoritairement utilisés pour les enrobés (9 %) et les ballasts (1 %).

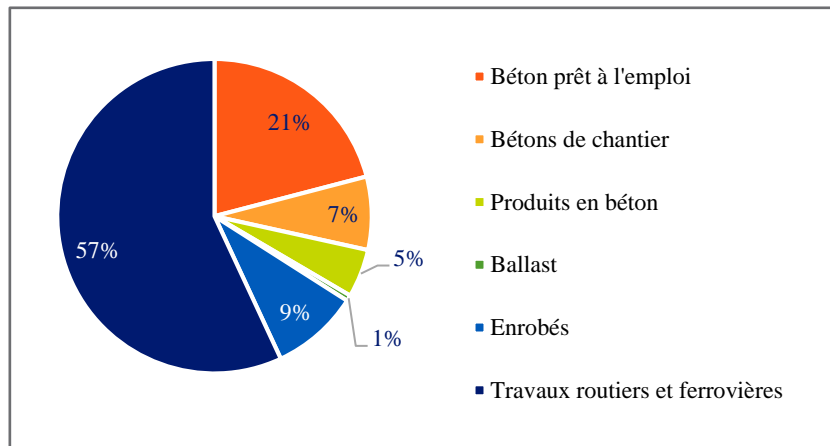


Figure 95 : Utilisation des granulats en 2016 en France

Les deux graphiques ci-dessous (Figure 94) montrent l'évolution de la consommation des granulats entre 2008 et 2014. Nous remarquons que la consommation a diminué de 85 Mt pendant cette période, mais que les parts de consommation en fonction du type de granulats sont du même ordre de grandeur. Cette baisse s'explique certainement par le ralentissement de l'activité économique suite à la crise de 2008. Ainsi, depuis une dizaine d'années, la consommation de granulats issus du recyclage tourne autour de 20 % par rapport à l'ensemble des granulats consommés.

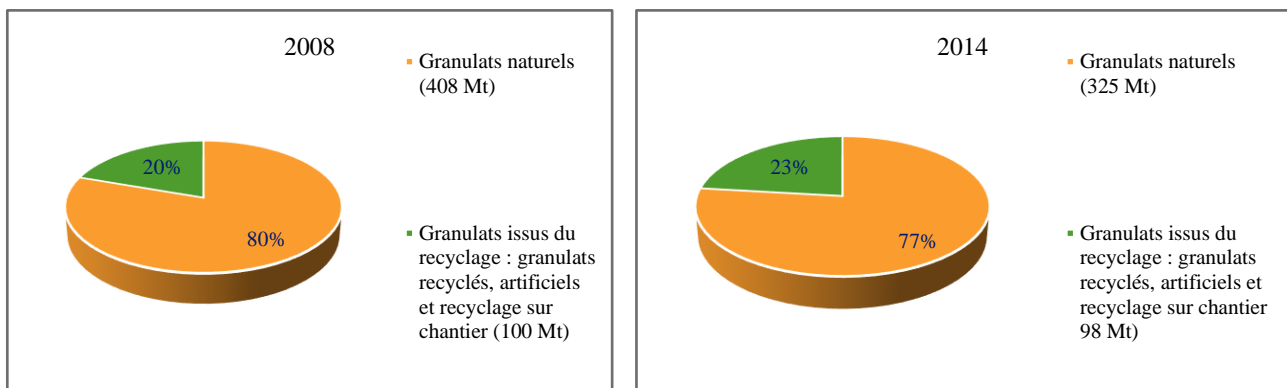


Figure 94 : Consommation des granulats en 2008 et 2014 en France

Bien qu'elle soit une ressource théoriquement inépuisable, l'extraction de granulats devient de plus en plus complexe pour de nombreuses raisons, notamment l'opposition des riverains à l'ouverture de nouvelles carrières (« NIMBY ») ou celle des élus (« NIMEY »), des zones situées à proximité des sites protégés, une réglementation de plus en plus stricte, ou encore une exploitation trop onéreuse.

#### 6.3.4. Les différentes solutions de valorisation

Aujourd'hui, 4 filières de valorisation sont intéressantes. Nous proposons de les détailler dans les sections suivantes.

##### Le remblai sur site

Le remblai sur site est une technique consistant à réaliser des travaux d'aménagement ou de réhabilitation d'un site à des fins de construction. Il s'agit d'utiliser des déchets inertes (ici les granulats) pour remettre à niveau le terrain. Le remblai réalisé doit garantir une certaine stabilité en cas de nouvelles constructions industrielles sur le site. La nature des matériaux utilisés va avoir un impact sur la qualité du remblai. Le *Tableau 136* ci-dessous est un extrait des conditions d'utilisation en remblai pour les différentes classes de matériaux.

Tableau 136 : Les conditions d'utilisation en remblai

SOUS CLASSE	OBSERVATION GENERALE	CONDITION D'UTILISATION EN REMBLAIS
F71 et F72 Matériaux de démolition épurés des matériaux putrescibles, criblés, déferrailés, homogénéisés, mais pouvant éventuellement contenir du plâtre	L'identification de ces matériaux doit être complétée par la mesure des paramètres retenus pour la classification des sols.	On adoptera les conditions applicables à la classe de sols ou de matériaux rocheux à laquelle ils sont assimilables d'identification. Les matériaux de la classe F72 doivent le plus souvent être proscrits dans les remblais contigus aux ouvrages d'art, en plateforme support de couche de forme ou d'assise traitée avec des liants hydrauliques (risques de formation d'ettringite avec certains ciments).

Les graves sont simplement manipulés avec un engin de manutention, afin de combler la cavité laissée par la déconstruction d'une centrale électrique par exemple. Lors de l'utilisation de gravats en couche finale d'un remblai (la couche supérieure, directement accessible), il peut être nécessaire de concasser plus finement les granulats. Les déchets inertes tels que les bétons peuvent selon les opérations de démolition et de remise en état d'un site, être réutilisés sur place en tant que remblai ou comblement de cavités.

### La valorisation en technique routière

En France, 80 % des granulats, soit environ 320 millions de tonnes chaque année, sont destinés aux infrastructures de mobilité et aux réseaux divers. Or, comme nous l'avons vu l'extraction de granulats devient de plus en plus compliquée. Il s'avère donc intéressant de recycler des déchets en tant que matériaux alternatifs dans la construction de route. Une description de la filière a été effectuée pour le cas d'étude portant sur les sédiments de barrage au *Chapitre 6 - §6.2.2*. Pour être utilisés dans la filière de la technique routière, les granulats peuvent subir des traitements particuliers afin de respecter des critères spécifiques tels que l'insensibilité à l'eau ou au gel.

### La valorisation dans le béton

Les granulats sont les principaux composants du béton, puisqu'ils représentent 70 % de leur masse. Pour fabriquer 1 m<sup>3</sup> de béton, il faut environ 2,5 t de granulats. Les sources de granulats sont bien réparties sur le territoire, mais elles sont de moins en moins accessibles puisque les contraintes environnementales et administratives en limitent l'accès. Pour limiter l'utilisation de granulats naturels dans le béton, il semble intéressant de chercher à les remplacer, au moins en partie, par des granulats recyclés.

Pour utiliser des granulats issus du béton dans le béton, il faut être vigilant aux granulats que l'on utilise. En effet, des caractéristiques différentes des granulats auront une influence sur le rendu final du béton. La norme française P18-545 explicite et complète les normes européennes concernant les granulats pour tenir compte du niveau d'exigence requis par les techniques actuelles<sup>[275]</sup>. L'homogénéité des caractéristiques des granulats est primordiale. Les granulats de béton concassé ne sont pas inclus dans cette norme, en raison d'un niveau d'exigence particulièrement élevé.

L'utilisation des gravats concassés de béton non pollué issus de la démolition est toutefois envisagée dans la fabrication de bétons destinés aux bâtiments et aux ouvrages de génie civil, en tant que granulats. Des études ont été réalisées dans le cadre plus large du projet RECYBETON, qui a débuté en janvier 2012<sup>[276], [277]</sup>. Il s'agit d'un projet collaboratif de recherche appliquée pour favoriser le recyclage du béton dans le béton, réunissant 47 partenaires, dont EDF. Un des objectifs est de rendre possible la réutilisation de l'intégralité des matériaux issus de béton déconstruit, y compris les fines (poudre de ciment), comme constituants de nouveaux bétons. Aujourd'hui, la filière semble incertaine, car des interrogations subsistent concernant la tenue mécanique des bétons utilisant de tels granulats, ainsi que leur taux d'absorption d'eau, plus difficile à déduire et pourtant indispensable pour réussir l'étape de gâchage (ajout de l'eau pendant la préparation du béton). Le *Tableau 137* répertorie l'influence de quelques caractéristiques du granulat sur les performances du béton<sup>[278]</sup> :

Tableau 137 : Influence des caractéristiques du granulat naturel sur les performances du béton

CARACTERE DU GRANULAT	INFLUENCE SUR LES BETONS
Nature minéralogique	La plupart des granulats conviennent pour le béton.
	Influence défavorable des argiles, des calcaires marneux (gonflement et altération à terme).
Présence de matières organiques	Influence défavorable sur la prise et le durcissement, chute de résistances.
Teneur élevée en sulfates, sulfures, chlorures	Réaction avec le ciment, fissuration, corrosion des armatures.
Propreté des granulats	Critère important. Les impuretés perturbent l'hydratation du ciment et entraînent des défauts d'adhérence granulats/pâte.

Néanmoins, les travaux des chercheurs du projet RECYBETON amènent à la conclusion qu'un certain pourcentage en masse des granulats peut être remplacé par des granulats de béton concassé. En effet, des petits ouvrages, tels que des murets, des dallages ou des trottoirs, ont été fabriqués dans le cadre de ce projet. Un premier chantier expérimental a ainsi cherché à construire un dallage de 2100 m<sup>2</sup> et de 18 cm d'épaisseur pour un usage de type parking à Chaponost (69) sur le site de la société ELTS en décembre 2013.

### Le comblement de carrière

Après l'exploitation d'une carrière, un projet de remise en état et de réaménagement doit être élaboré par les industriels chargés des travaux. Ceci se fait en concertation avec les propriétaires, les communes, les riverains, les associations et les pouvoirs publics. Le but est de réintégrer l'ancienne carrière dans le paysage. En fonction du type de carrière, des caractéristiques et de l'environnement dans lequel le site est situé, plusieurs projets de réaménagement sont possibles (Tableau 138)<sup>[278]</sup>.

Tableau 138 : Possibilité d'aménagement de carrières en fonction de leurs caractéristiques et de leur environnement

CARACTERISTIQUES	CRITERES D'ENVIRONNEMENT	POSSIBILITES D'AMENAGEMENT	
<b>CARRIERES EN EAU</b>			
Faible profondeur d'eau	Rural	Réserve ornithologique — Chasse du gibier d'eau Réserves d'eau — Mise hors d'eau et réutilisation agricole ou sylviculture	
	Périurbain et urbain	Coupure dans l'urbanisation — Remblayage Partiel ou total pour utilisation en zones vertes et de loisirs ou en zones constructibles	
Profondeur d'eau	Rural	Pêche de loisir — Pisciculture — Baignade — Barque et canotage — Port de plaisance — Bassin d'infiltration — Bassin de stockage	
	Périurbain et urbain	Plan d'eau (lotissement au bord de l'eau) — Port industriel — Port de plaisance — Bases de loisirs polyvalentes	
<b>CARRIERES A SEC</b>			
En fosse	Rural	Reconstitution du terrain — Reverdissement agricole — Reboisement — Réserve naturelle	
	Périurbain et urbain	Remblayage — Coupures vertes — Parc — Zone d'habitation — Zone industrielle — Lac artificiel	
À flanc de relief	Parois meubles	Tous environnements	Mise en végétation
	Parois rocheuses	Vues éloignées	Confortement et traitement de la paroi
		Vues rapprochées	Talus végétalisé
	Fond de carrières	Rural	Mise en végétation (prairie, agriculture, sylviculture) — Réserve naturelle
Périurbain et urbain		Parc de verdure — Parc de véhicules — Zone industrielle — Zone de loisirs - Terrain de sport	

La création de bases de loisir, de plans d'eau ou de réserves ornithologiques est souvent favorisée pour les carrières en eau, si cela respecte les spécificités réglementaires locales et territoriales. Tandis que pour les carrières à sec, la carrière sera souvent reboisée ou remise en état à des fins agricoles. La filière des carrières du BTP en activité et en fin de vie est en effet assez bien répartie sur le territoire.

### 6.3.5. Conclusion sur les filières

L'application de la démarche CLE décrite dans l'introduction générale et plus particulièrement la partie **Connaitre** a permis d'identifier différentes filières de valorisation. Les gestionnaires opérationnels ont le choix entre les solutions décrites dans les paragraphes ci-dessus et résumés à la *Figure 96* ci-dessous.

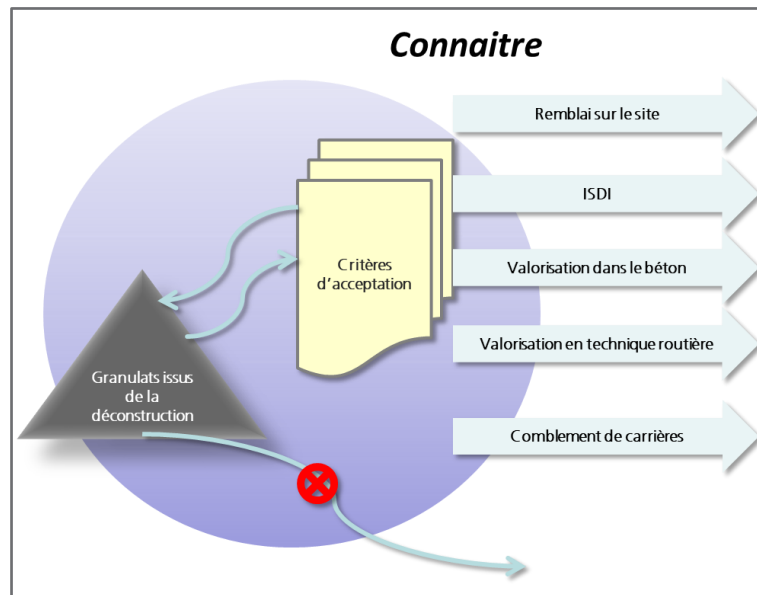


Figure 96 : Filières retenues pour la valorisation des granulats issus de la déconstruction

### 6.3.6. Étude de cas portant sur les granulats de la déconstruction

#### 6.3.6.1. Mise en contexte

En vue de la déconstruction du parc à charbon de l'ancien Centre de Production Thermique (CPT) de Vitry-sur-Seine (94) et de ses ouvrages annexes, nous proposons d'évaluer et de comparer les différentes orientations possibles pour les bétons de la déconstruction. Ces derniers représentent une masse totale de 67 000 tonnes soit plus de 91 % du tonnage total de déchets. Le contexte de ce chantier, situé en Ile-de-France est particulier. En effet, en 2010, la production de granulats naturels en Île-de-France s'élevait à 8,8 millions de tonnes, à laquelle il faut ajouter 4,7 millions de tonnes de matériaux issus du recyclage. La demande régionale est de l'ordre de 30 millions de tonnes, soit un solde déficitaire de près de 15 millions de tonnes. Ce déficit de matériaux de construction amène la région à importer en moyenne plus de 45 % de sa consommation annuelle de granulats. Par ailleurs, le non-renouvellement des capacités de production en Île-de-France conduit à l'éloignement des sources d'approvisionnement. En 2010, près de 17 % des matériaux consommés en Ile-de-France avaient parcouru plus de 120 km entre leurs lieux de production et leurs lieux de consommation.

Pour ces bétons, plusieurs solutions de valorisation sont envisageables. En effet, il est possible de valoriser les bétons inertes de la déconstruction en réemploi sur le site en effectuant un remblaiement (à la condition que les caractéristiques physiques et géotechniques le permettent), les valoriser en technique routière, en comblement de carrières ou en les réintégrant dans le béton. Une dernière solution consisterait à les évacuer en installations de stockage de déchets inertes (ISDI).

6.3.6.2. Résultats

La deuxième étape de la méthodologie CLE, *Localiser*, a été de trouver et de géoréférencer les installations. Nous l'avons réalisée en collectant les informations (Tableau 139) auprès des installations classées, de la FFB, du BRGM, de SINOE, du Grand Paris et de l'ORDIF.

Tableau 139 : Les bases de données créées

ICPE	FFB	BRGM	SINOE	GRAND-PARIS	ORDIF
2515 Concassage Broyage	Les centres de traitement	Les carrières en exploitations	Les installations de transits	Réaménagement de carrières classiques	Liste des carrières autorisées à remblayer avec des matériaux extérieurs
2518 Béton prêt à l'emploi	Les collecteurs	Les carrières fermées	Les installations de stockage de déchets inertes	Réaménagement de carrières Gypse	Liste des centres de tri et des déchetteries professionnelles
2760 Installation de stockage de déchets inertes	Les déchetteries publiques			Réaménagement de carrières ISDI+	Liste des installations de stockage de déchets inertes
2517 Installation de transit				Réaménagement de carrières ISDI	Liste des plateformes regroupement-transit de déchets inertes
2510 Exploitation de Carrières					

La compilation de ces informations a permis de créer une base de données des installations en France, en Ile de France et à proximité du CPE de Vitry-sur-Seine. Nous avons ensuite géoréférencé les installations afin de les représenter sur une carte (Figure 97).

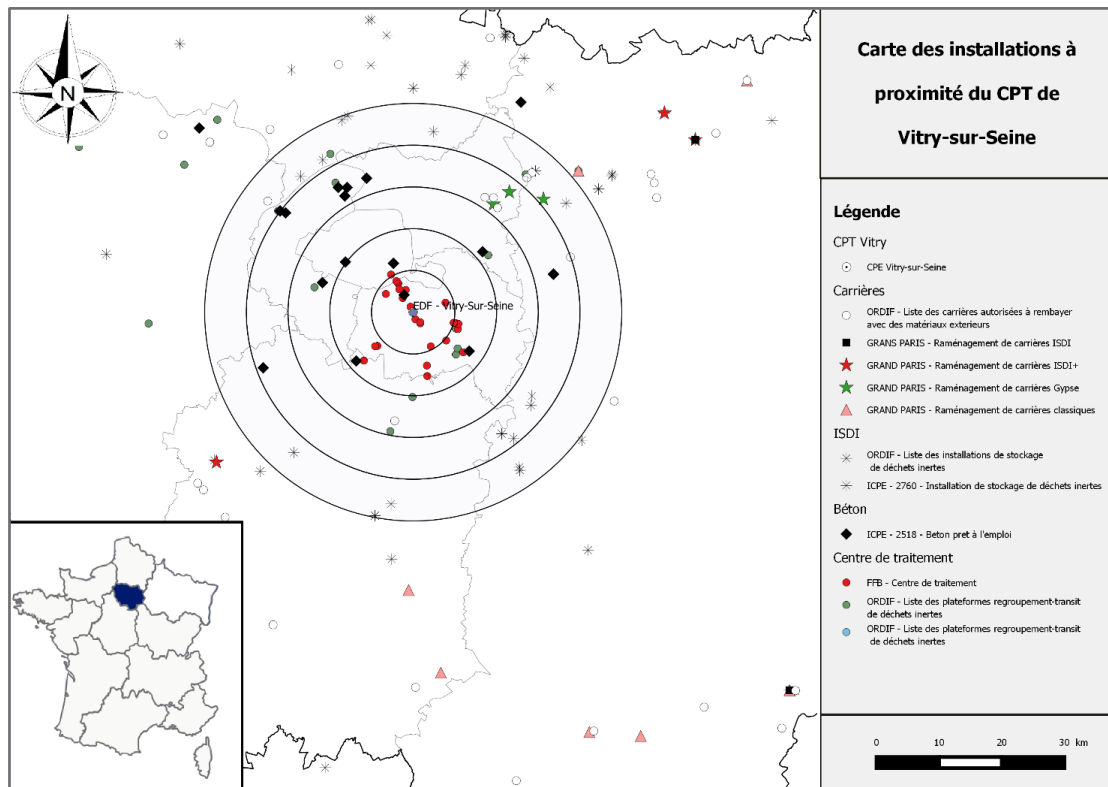


Figure 97 : Carte des installations à proximité du CPT de Vitry-sur-Seine



Les gestionnaires de déchets EDF en charge des bétons de déconstruction du CPE de Vitry-sur-Seine ont le choix entre les possibilités (les plus proches) présentées dans le *Tableau 140* ci-dessous.

Tableau 140 : Extrait des installations à proximité du CPE de Vitry-sur-Seine

REMBLAI SUR SITE	ISDI	BETON DANS LE BETON	COMBLEMENT DE CARRIERES	COMBLEMENT DE CARRIERES DE GYPSE	COMBLEMENT DE CARRIERES AVEC STATUT ISDI	COMBLEMENT DE CARRIERES AVEC STATUT ISDI+	PLATEFORME DE RECYCLAGE (TECHNIQUE ROUTIERE)
CPE Vitry-sur-Seine	TERRALIA (ISDI)	CEMEX Béton IDF	Calcaire de la BRIE Pecy	Siniat Le Pin-Villevaudé	CEMEX Granulats	Cosson Cregy-les-Meaux	Yprema Emeranville
	ECT (ISDI)	Equiom	Calcaire de la BRIE Vaudroyes-en-Brie	ECT Bernouille	Marolles-sur-Seine	ECT Froges-les-bains	POINT P ALFORTVILLE
	SUEZ RV Île-de-France	SOGEA TPI	Piketty Ecuelles	ECT Clichy-sous-Bois		Veolia REP Monthyon	SEPUR SASU
	SEMAVERT	BETON SOLUTIONS MOBILES	Clamens Torcy-en-Multien				LA PLATEFORME DU BATIMENT IVRY
	SITA FD	LAFARGE BETON	Semarvert Ballancourt				SITA ILE DE France
			Gagneraud Bannost-Villegagnon				

Le référencement plus complet (mais non exhaustif) des installations trouvées à proximité du CPE de Vitry-sur-Seine est disponible à l'Annexe 6.9 à l'Annexe 6.12.

Pour le gestionnaire de déchets de Vitry-sur-Seine, la question est « *Comment arbitrer entre les différentes voies de gestion, présentées ci-dessus, pour le devenir des bétons issus de la déconstruction ?* »

Pour simplifier la comparaison, nous avons sélectionné les installations les plus proches du site de déconstruction, à savoir :

- V<sub>1</sub> — Une réutilisation en remblais sur le site de déconstruction,
- V<sub>2</sub> — Une plateforme de recyclage (destinée à de la technique routière) à 22,94 kilomètres,
- V<sub>3</sub> — Une valorisation dans le béton à 3,8 kilomètres,
- V<sub>4</sub> — Une valorisation en comblement de carrières à 38,6 kilomètres,
- V<sub>5</sub> — Une élimination en comblement de carrières (statut ISDI) à 44 kilomètres.

Les résultats sont les suivants :

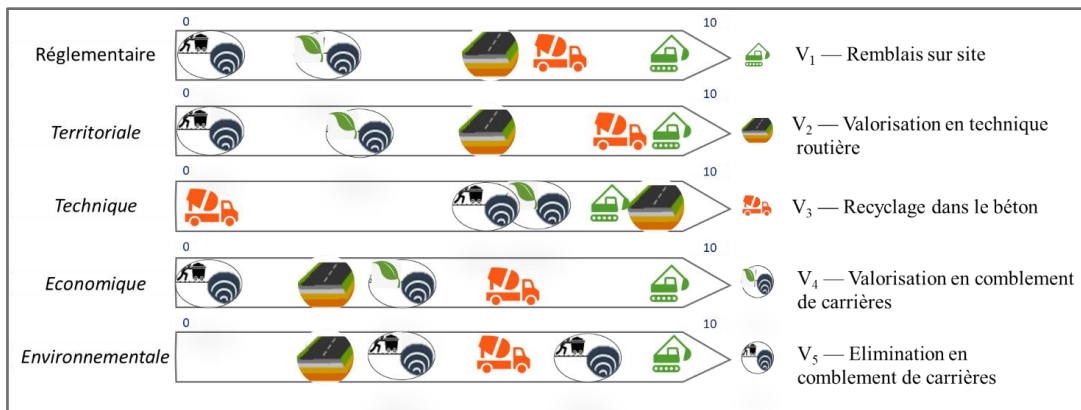


Figure 98 : Résultats de la comparaison des installations sur les 5 dimensions (normalisées)



La *Figure 98* ci-avant montre qu'il n'existe pas une solution idéale sur les 5 dimensions étudiées. Les installations  $V_1$  et  $V_3$  se distinguent sur la dimension réglementaire alors que ce sont les solutions  $V_3$  pour la dimension économique. Au niveau technique, si l'on met de côté  $V_3$ , les solutions sont presque toutes équivalentes. Enfin d'un point de vue territorial, il est préférable de diriger le flux de granulats vers les installations  $V_1$  et  $V_3$ , puis  $V_2$  et  $V_4$ .

### 6.3.7. Présentation des résultats et discussion

De la même manière que les précédentes études de cas portant sur les déchets de bois (cf. *Chapitre 6 — §0*) et les sédiments (cf. *Chapitre 6 - §6.2*), nous proposons dans cette partie de détailler la dernière partie de la méthodologie CLE, la partie *Evaluer*.

#### 6.3.7.1. Dimension réglementaire

Au niveau de la dimension réglementaire, c'est la réutilisation sur site qui est à privilégier (*Figure 99*).

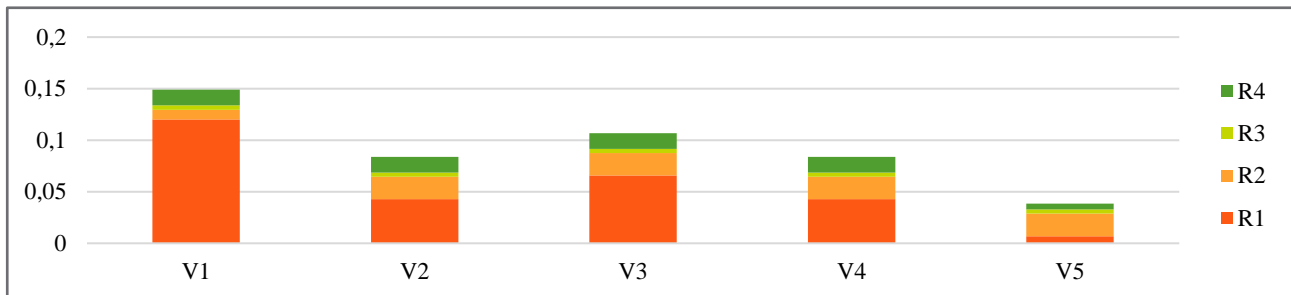


Figure 99 : Étude de cas granulats — réglementaire

Cette opération qui consiste à réutiliser les bétons en remblais et en comblement de cavité ( $V_1$ ) créée suite à la déconstruction est la première recommandation de la hiérarchie de gestion des déchets. La deuxième voie de valorisation à privilégier est la réintégration des granulats de béton ( $V_3$ ) dans la production d'un nouveau béton. Aujourd'hui, cette voie est toujours en cours de recherche, mais plusieurs travaux montrent des possibilités industrielles (béton de fondation, surface horizontale). Enfin, il s'agit d'orienter les déchets en valorisation matière soit, en technique routière ( $V_2$ ) soit en comblement de carrière ( $V_4$ ). En effet, dans le cadre de leur remise en état, les carrières peuvent recevoir des matériaux inertes (en fin et en cours d'exploitation) de l'extérieur pour leur comblement, cette opération est considérée comme de la valorisation par la réglementation. D'après les critères réglementaires, l'élimination en comblement de carrière ( $V_5$ ) n'est pas une voie à recommander. La distinction entre la valorisation et l'élimination pour le comblement de carrière dépend du statut de celle-ci.

Il y a un enjeu économique que nous détaillons dans la partie suivante.

#### 6.3.7.2. Dimension économique

La *Figure 100* ci-dessous dévoile les résultats détaillés de la comparaison sur les critères économiques.

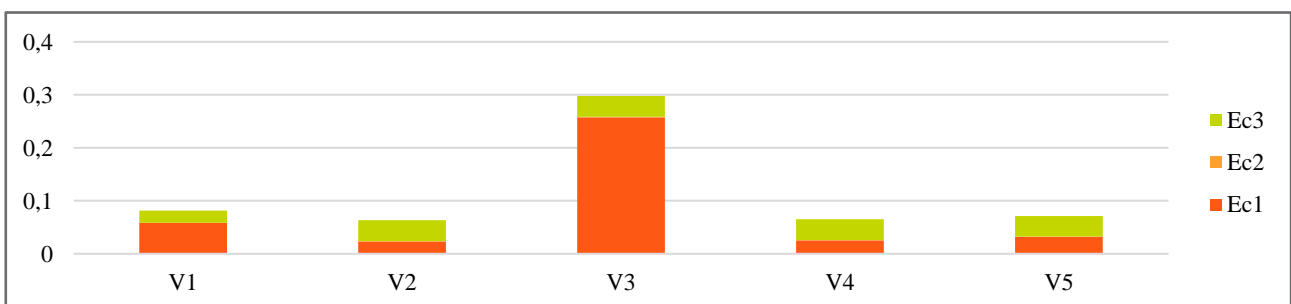


Figure 100 : Étude de cas granulats - économique

Les résultats de cette partie sont à interpréter avec précaution. En effet, l'installation de fabrication de béton prêt à l'emploi ( $V_3$ ) est une voie en cours de développement. Néanmoins, il apparaît que cette voie est la seule

solution qui permet d'éviter et/ou de réduire efficacement les coûts de traitement des granulats. Les hypothèses et les données de coûts pour chacune des installations ont été les suivantes :

Tableau 141 : Hypothèses et données de coûts pour l'étude de cas granulats

	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	V <sub>4</sub>	V <sub>5</sub>
<b>DISTANCE (KM)</b>	0	22,5	3,8	38,6	31,3
<b>TRANSPORT *(€/T) ** (€/T/KM)</b>	0	1,12*	1,72**	4,77**	4,65**
<b>CHARGEMENT (€/T)</b>	0	4,5	4,5	4,5	4,5
<b>TRAITEMENT (€/T)</b>	5,61	9	5,61	3	3
<b>REVENTE DES MATERIAUX</b>	0	-22,70	0	0	0
<b>TOTAL (€/T)</b>	<b>5,61</b>	<b>14,70</b>	<b>-10,87</b>	<b>12,27</b>	<b>12,15</b>

La Figure 101 ci-dessous montre les résultats dans le cas où l'installation de recyclage dans le béton V<sub>3</sub> n'est pas accessible directement. Dans ce cas, la solution V<sub>1</sub> – Remblai sur site est la meilleure des solutions d'un point de vue économique.



Figure 101 : Étude de cas granulats — économique — variante

Il s'agit alors de faire appel à un prestataire qui a l'habitude de travailler avec les industries utilisatrices des matériaux de recyclage. Le principal avantage lié à ce mode de fonctionnement est que la société prestataire (type Yprema ou Clamens) se charge de la valorisation en technique routière ou en recyclage dans le béton. En revanche, la marge prise au moment de la revente du matériau (environ 22,70 € la tonne chez Yprema IDF) pour un usage en couche de forme ou de fondation est à la main de la société prestataire.

### 6.3.7.3. Dimension technique

Au-delà des résultats de la comparaison sur cette dimension (Figure 102), la recherche d'information apporte un regard sur le long terme.

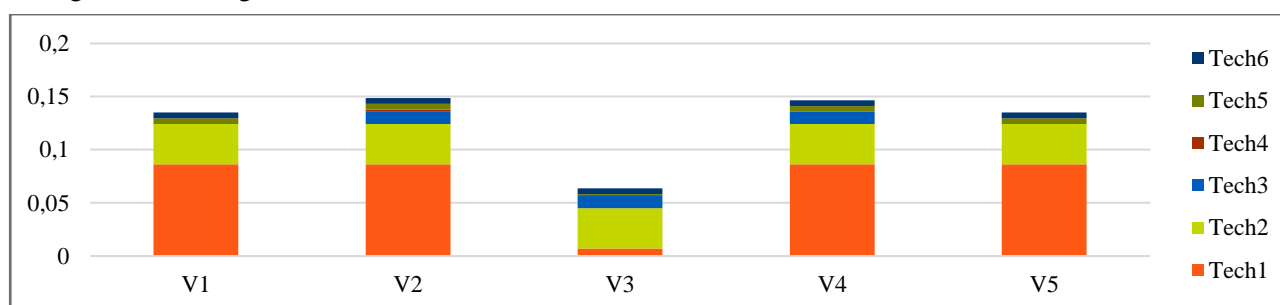


Figure 102 : Étude de cas granulats – économique

En effet, le recyclage des granulats dans le béton (V<sub>3</sub>) est pour le moment une voie non pérenne et robuste, mais qui est amenée à se développer dans les années à venir. Au niveau d'EDF et des prochains grands travaux de déconstruction, c'est donc une voie à investiguer pour maintenir et améliorer le taux de recyclage (externe) des granulats de bétons. De plus, dans le cas de Vitry-sur-Seine il y a une double problématique liée aux déchets de construction et de déconstruction au niveau de la région Ile de France. En effet, le nombre de

carrières de granulats autorisées sur le territoire régional est en constante diminution depuis une vingtaine d'années : 136 en 1994, 75 en 2004 et 62 en 2015. Ainsi, la première problématique est la situation déficitaire de l'Ile-de-France en matière de production par rapport à la demande. L'Ile-de-France doit importer une part élevée de sa consommation pour couvrir ses besoins en granulats. Depuis une vingtaine d'années, l'Ile-de-France doit recourir de plus en plus aux apports extérieurs pour satisfaire sa demande. En effet, entre 1986 et 2000, passent de 37 % à 41 % et depuis 2003, les taux d'importation sont de l'ordre de 45 %.

Ensuite, le second problème est lié aux déblais générés par le Grand Paris. En effet, la construction du Grand Paris Express va générer sur environ 10 ans presque 45 millions de tonnes de déblais. Ce volume représente une augmentation annuelle de 20 % de la production totale de déchets et la Société du Grand Paris s'est engagée à en valoriser 70 % à l'échelle globale du projet, tout en respectant au mieux le principe de proximité. Il va donc se poser au moment de la déconstruction de Vitry-sur-Seine, des questions liées aux capacités des exutoires à proximité du CPT.

#### 6.3.7.4. Dimension environnementale

La Figure 103 présente les résultats issus de la comparaison.

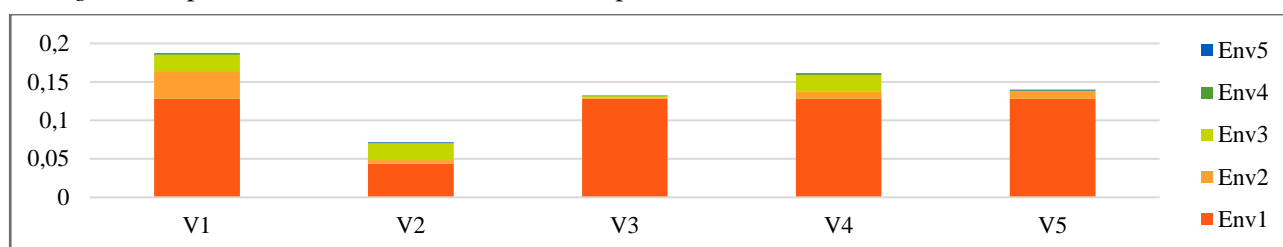


Figure 103 : Étude de cas granulats – environnement

Pour les obtenir, nous avons comparé les installations via les données présentées au Tableau 142 ci-dessous. Ce tableau est un extrait des données fournies en Annexe 6.13. Le choix des données utilisées dépend de la qualité de la donnée ACV (dernière actualisation et contrôle de la donnée via une revue critique).

Tableau 142 : Les données choisies pour la comparaison des installations sur les critères environnementaux

CRITERES	ENV1	ENV2		ENV3	ENV4	ENV5
	Impacts environnementaux réglementés	Changement climatique (kg CO <sub>2</sub> eq)		Économie de ressource	Eau (m <sup>3</sup> /T)	Énergie (MJ/T)
Installations	Nombre de mise en demeure ayant trait à l'environnement	Transport (routier) t. km	Process (hors utilisation et fin de vie)			
V <sub>1</sub>	Sans impact	0	2,99 kg CO <sub>2</sub> eq/tonne	≥ 80 %	0,018	0,33
V <sub>2</sub>	1 mise en demeure	2,63	41,69*	≥ 80 %	0,018***	0,33
V <sub>3</sub>	Sans impact	0,44	90,99**	≥ 20 %	0,393 02	717,21
V <sub>4</sub>	Sans impact	4,52	2,99 kg CO <sub>2</sub> eq/tonne	≥ 80 %	0,018	0,33
V <sub>5</sub>	Sans impact	3,66	2,99 kg CO <sub>2</sub> eq/tonne	≥ 80 %	0,018	0,33

\* Fabrication de granulats concassés (2,99 kg CO<sub>2</sub> eq/tonne) + 10 km de transport de chantier routier (1,7 kg CO<sub>2</sub> eq/tonne) + Fabrication de la route (37 kg CO<sub>2</sub> eq/tonne)  
 \*\* Fabrication de granulats concassés (2,99 kg CO<sub>2</sub> eq/tonne) + Fabrication de béton (88 kg CO<sub>2</sub> eq/tonne)  
 \*\*\* Principalement du lavage (source Yprema)

Sur cette dimension, il est évident qu'il est préférable d'orienter le flux de granulats vers un remblai sur site puisque cette voie de valorisation ne nécessite pas de transport et peu de procédés industriels (uniquement de la consommation de carburant liée aux engins de manutention). La voie V<sub>2</sub> est défavorisée à cause de son résultat sur le critère Env<sub>1</sub>. Cette mise en demeure date de 2013 et après cinq années, on peut conclure

qu’aujourd’hui cette installation a fait le nécessaire pour se mettre en conformité. Enfin, on remarque que malgré les fortes différences de consommation en eau et en énergie entre la voie V<sub>3</sub> et les autres voies de valorisation, ces deux critères influencent peu les résultats. Cela est dû au poids faible de ces deux critères de la dimension environnementale.

### 6.3.7.5. Dimension territoriale

La Figure 104 ci-dessous montre les résultats sur la partie territoriale. Il est évident que la valorisation en remblai sur site est la voie à privilégier. Elle permet de répondre au mieux aux deux plus importants critères de la dimension territoriale (Ter1 — Favoriser l’économie locale et Ter2 — Utilisation locale de la ressource).

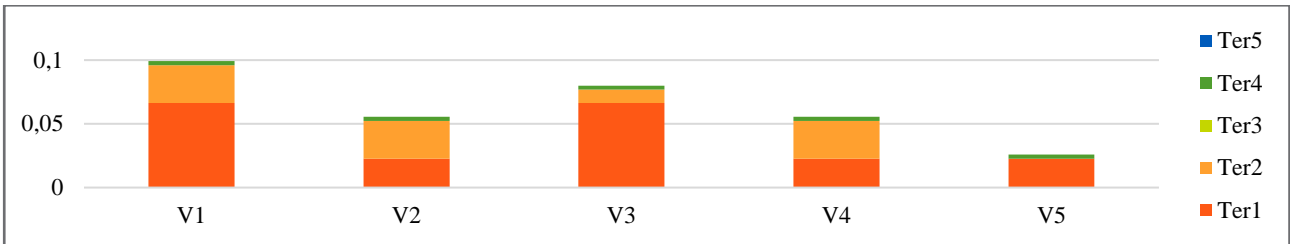


Figure 104 : Étude de cas granulats – territoire

Le critère Ter<sub>3</sub> — Capacité à transporter le déchet sur le territoire ne permet pas, dans ce cas de figure, de distinguer fortement les installations puisqu’elles sont toutes situées en Ile de France. On rappelle que ce critère est composé de deux sous critères (cf. Chapitre 4 - §0). Le premier permet bien de différencier les installations puisque les données utilisées sont de niveau départemental alors que le second est composé de données de niveau régional (Tableau 143).

Tableau 143 : Résultats bruts sur les critères Ter<sub>3.1</sub> et Ter<sub>3.2</sub>

SOUS-CRITERES TER3	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	V <sub>4</sub>	V <sub>5</sub>
Scores Ter <sub>3.1</sub>	0,105	0,098	0,045	0,265	0,144
Scores Ter <sub>3.2</sub>	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006

### 6.3.8. Discussion générale sur le cas d’étude

Ce cas d’étude portant sur les granulats de la déconstruction fait apparaître la complexité territoriale de la gestion des déchets du BTP (Figure 105).

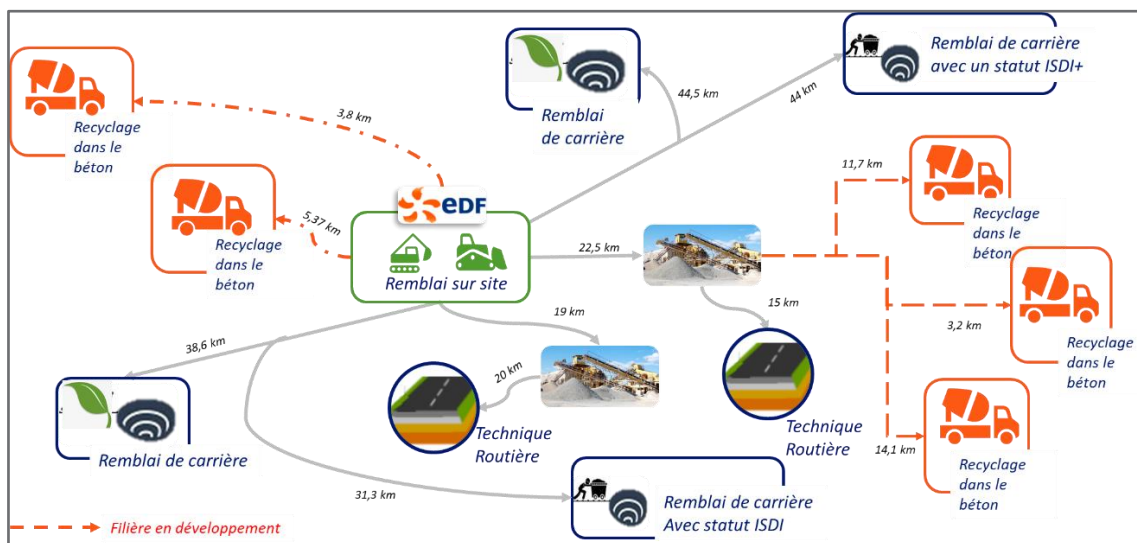


Figure 105 : Schéma conceptuel du territoire (extrait des installations)

Il est alors très difficile d'évaluer des installations sur cette dimension puisque nous ne connaissons pas la destination des flux de granulats. En effet, les flux de gravats passent d'abord par des installations de recyclage et de concassage avant d'être dirigés vers les chantiers. Nous avons donc modélisé des scénarios potentiels. De plus la voie « recyclage dans le béton » est aujourd'hui en cours de développement.

L'étude des granulats issus de la déconstruction a nourri une réflexion sur les scénarios d'organisation dans la chaîne de valorisation :

- concasser les graves sur place puis transporter les granulats vers les installations de valorisation,
- transporter les graves vers les installations de valorisation et puis concasser,
- confier l'ensemble de la gestion du concassage et du transport à un prestataire externe. Celui-ci s'occupe alors de toute la chaîne de valorisation, mais nous ne connaissons pas le lieu et le type de valorisation finale (technique routière ou fabrication de béton). Ce type de fonctionnement est un contrat tout-en-un où le gestionnaire de déchets ne maîtrise pas les coûts entre les différents intervenants,
- effectuer le concassage sur le site puis revendre les granulats directement aux entreprises de fabrication de béton ou de travaux publics (technique routière). Ce mode de fonctionnement permet de maîtriser les coûts de revente des matériaux.

Enfin les échelles des critères *Ter1 — Favoriser l'économie locale* et *Ter2 — Utilisation locale de la ressource* sont difficiles à appliquer dans ce cas d'étude en Île-de-France. En effet, les départements de la région sont très rapprochés et le site de Vitry-sur-Seine est situé à proximité de plusieurs frontières départementales. En conséquence, une installation qui se trouve à proximité (15 kilomètres) se retrouve avec une note dégradée à cause de l'échelle d'évaluation qui est administrative. Enfin, le critère *Ter3 - Capacité à transporter le déchet sur le territoire* gagnerait, pour le cas Ile de France, à être transformé et/ou adapté en critère de mesure du temps de parcours. En effet, le maillage territorial de la région est le plus important des régions de France, mais le nombre de véhicules sur le réseau, le temps de parcours est aussi l'un des plus longs.

## 6.4. DISCUSSION

Les études de cas ont permis d'apporter des réflexions liées à la gestion des déchets mais aussi, elles ont contribué à améliorer la construction de l'outil. Ces améliorations sont rassemblées dans le *Tableau 144*. Certains de ces éléments ont d'ores et déjà été détaillés dans ce chapitre, nous proposons de préciser les éléments en gras à la suite de ce tableau.

*Tableau 144 : Apports des études de cas*

	DECHETS DE BOIS	SEDIMENTS	GRANULATS
	<b>3 installations comparées</b>	<b>5 installations comparées</b>	<b>5 installations comparées</b>
<b>APPORTS</b>	<b>Analyses de sensibilité</b>	<b>Développement de l'outil informatique</b>	Réflexion sur la partie Localiser (choix des bases de données pertinentes à utiliser)
	Représentation graphique des résultats	<b>Première utilisation de l'outil par une personne externe à sa construction</b>	Scénarios de valorisation
		Ciblage des efforts de recherche et d'investissement pour des voies nouvelles	Amélioration de la sélection des bases de données pour la partie « localiser ».
	<b>Rendre opérationnel le questionnaire</b>		

Ces trois cas ont nécessité d’approfondir le questionnaire. A ce jour, il est assez complet pour pouvoir se faire une opinion sur une installation et non rébarbatif puisque les personnes interrogées se sont facilement prêtées au jeu. Il permet d’établir un dialogue sur les 5 domaines d’études avec les intéressés. Lors des interviews, nous n’avons pas eu de remarques particulières tant sur la forme que sur le fond.

Au *Chapitre 4*, nous avons vu que l’outil a été utilisé pour la comparaison de 2 installations de gestion des déchets amiantés. Les études portant sur les déchets de bois puis les sédiments et les granulats issus de la déconstruction ont montré que l’outil peut comparer 3 et 5 installations. Cette augmentation du nombre d’installations à comparer nous a conduits à informatiser la méthodologie de comparaison (*Figure 106*) afin de pouvoir effectuer des analyses de sensibilité (liées aux données et/ou aux hypothèses) plus rapidement et de manière plus fiable. L’interface utilisateur est composée de plusieurs boites de dialogues permettant choisir rapidement le niveau d’évaluation des installations comparées sur chacun des critères et de paramétrer les options d’agrégation (cf. *Chapitre 3 - §3.6*).

Informations générales		Code postale EDF	Code Déchet EDF	Code E.U.	NATURE DU DECHET	
		77000	012a	17.01.01	Béton non polié provenant de la démolition (dont poteaux béton)	

Informations critères						
		Installation A	Installation B	Installation C	Installation D	Installation E
Type de Notes	Code Postal	77000	77000	51300		
Types de Poids	Critères					
Geométrique	R1	Préparation en vue de la réutilisation	Valorisation Matière	Recyclage	Valorisation Matière	Elimination
	R2	Oui	Non	Non	Non	Non
	R3	0	24	169		
Agrégation Notes	R4	Code R/D de l'installation	Code R/D de l'installation	Code R/D de l'installation	Code R/D de l'installation	Code R/D de l'installation
Amont		R5	R5	R5	R5	D5
Agrégation Poids		La filière est correcte	La filière est correcte	La filière est correcte	La filière est correcte	La filière est acceptable
Amont		2,61 €	14,70 €	11,70 €		
	EC1		23			
	EC2					
	EC3	Filière à l'équilibre	Filière avec des capacités excédentaires	Filière avec des capacités excédentaires		
	T1	≥ 10	≥ 10	1		
	T2	Oui	Oui	Oui		
	T3	Oui	Oui	Oui		
	T4		23	1 ou 2		
	T5	>200%	>200%	< 50%		
	T6	Oui	Oui	Oui		
	Env1	Sans Impact	Remis en cause	Sans Impact		
	Env2	2,99	5,472	20,397		
	Env3	≥ 80%	≥ 80%	≥ 20%		
	Env4	0,018	0,018	127,43		
	Env5	0,33	0,33	742,83		
	Ter1	Local	Local	Région		
	Ter2		Local	Département		
	Ter3.1	077	077	051	0	0
	Ter3.2	077	077	051	0	0
	Ter4	± 18	± 7 à 3	264		
	Ter5.1	077	077	051	0	0
	Ter5.2	077	077	051	0	0
	Ter5.3					

Figure 106 : Interface utilisateur de l’outil informatique

Les travaux de Nada AISSAMI, élève ingénieur de l’INSA de Lyon en stage à la R&D d’EDF et intégrée à l’équipe déchets, ont montré que la méthodologie de comparaison et l’outil informatique est facile d’utilisation. En effet, Nada a été la première utilisatrice de notre outil qui n’avait pas participé aux réflexions et à la construction.





## CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES

---

Cette dernière partie du manuscrit vise à retracer les éléments qui ont été identifiés comme importants lors des travaux de thèse. Dans un premier temps, il s'agit de rappeler les objectifs initiaux des travaux puis d'apporter un certain nombre d'éléments de discussion liés aux aspects scientifiques et opérationnels avant d'ouvrir le sujet à de potentiels futurs travaux de recherche ou de développement pour l'entreprise.

### Rappel des objectifs

Ce travail de thèse avait pour objectif de proposer un outil d'aide à la décision dans le choix de l'orientation de flux de déchets. Pour cela, le travail de recherche s'est orienté vers la prise en compte de 5 dimensions : économique, réglementaire, territoriale, technique et environnementale.

Pour répondre à la question scientifique principale, « *Comment, à partir d'outils et de méthodes approuvés par la communauté scientifique, évaluer et comparer des installations de gestion des déchets selon les cinq dimensions retenues ?* », nous avons établi cinq objectifs :

- prendre connaissance et analyser les outils et les méthodes pouvant être utilisés dans un contexte de gestion des déchets (*Chapitre 2*),
- construire, via une démarche recherche-action, un outil d'évaluation et de comparaison des installations en intégrant les cinq dimensions préalablement définies (*Chapitre 3*),
- établir la liste des critères d'évaluation de chacune des dimensions (*Chapitre 4*),
- créer un modèle sur le cas des déchets amiantés (*Chapitre 5*),
- valider le modèle sur des cas d'étude précis : produire des jeux de données afin d'évaluer et de comparer des installations de gestion pour les déchets de bois, les granulats de béton issus de la déconstruction et pour les sédiments (*Chapitre 6*).

La réalisation de ces objectifs a permis de lever les verrous qui ont été identifiés progressivement durant les travaux :

- comment intégrer dans le modèle des critères qualitatifs et quantitatifs en utilisant des échelles d'évaluation communes et comparables ?
- comment construire les échelles d'évaluation des différents critères retenus pour rendre le modèle utilisable pour plusieurs déchets ? quelles sont les données à utiliser ?
- quels sont le nombre et les profils d'experts à mobiliser ? Comment les questionner et intégrer leurs avis ? Comment prendre en compte des avis divergents ?
- comment visualiser simplement pour pouvoir interpréter facilement les résultats issus des évaluations et des phases de comparaison ?

Ces problèmes scientifiques et opérationnels ont été levés au fur et à mesure de l'avancée des travaux et ont été présentés dans les chapitres composant ce manuscrit.

### Conclusions générales

Les paragraphes ci-après rappellent les principaux enseignements tirés des chapitres du manuscrit.

Les travaux de thèse s'inscrivent dans le champ de recherche du génie industriel. Cette thématique a permis d'assembler les différentes briques scientifiques que sont l'environnement, l'économie, le territoire, avec les aspects opérationnels et concrets, technique et réglementaire. Pour prendre en considération les 5 dimensions retenues, nous nous sommes tournés vers le champ scientifique « recherche opérationnelle » qui couvre les outils et les méthodes d'aide à la décision multicritères.

Après avoir établi une revue de la littérature poussée couvrant les champs étudiés, nous avons pu dégager une proposition méthodologique (cf. §*Chapitre 3*) qui a permis de construire un outil d'aide à l'arbitrage

(cf. *Chapitre 4*) en s'appuyant sur la méthode AHP et sur la base d'une étude de cas sur un déchet industriel : les déchets amiantés (cf. *Chapitre 5*).

Nous avons démontré que l'outil était applicable à différents déchets et que la méthode est flexible et facile d'utilisation. Les études (cf. §*Chapitre 6*) portant sur les déchets de bois, les sédiments et les granulats ont confirmé que notre proposition se positionne dans la thématique de l'aide à la décision, puisqu'elle permet d'aider un gestionnaire de déchet à comparer plusieurs voies de valorisation en étant accompagné d'un avis moyen d'experts. Ainsi, il n'est pas seul à prendre une décision puisque la méthode permet un classement par ordre d'importance, via les recommandations des experts, des critères à prendre en considération. Toutefois, l'outil ne propose pas la meilleure des solutions comparées ou la solution idéale, puisque les cinq dimensions ne sont pas agrégées, mais donne la possibilité au décideur opérationnel de choisir une voie de valorisation selon le meilleur compromis et l'expérience des conditions locales que connaît le gestionnaire de déchet. Par ailleurs, le dialogue avec le management de l'entreprise est facilité du fait de l'existence d'un outil normalisé dont le fonctionnement est partagé. Il offre la possibilité de se focaliser uniquement sur les arbitrages à effectuer en fonction des informations produites par l'outil.

### **Apports et contributions à la recherche**

Nous estimons que nos travaux ont apporté plusieurs résultats. Nous proposons de les présenter dans cette partie.

Le tout premier est un état de l'art des méthodes, des outils et des critères qui sont ou ont été utilisés dans les études liées à la gestion des déchets. Le *Chapitre 2* rassemble ainsi tous ces éléments. Il s'agit principalement de méthodes d'analyses environnementales et/ou économiques, mais qui peuvent aider à prendre une décision pour l'orientation d'un flux de déchets. Néanmoins, ces méthodes d'évaluation n'ayant pas été spécialement conçues pour prendre en compte l'ensemble des dimensions étudiées. L'état de l'art a été étendu aux méthodes d'aide à la décision multicritères. Ces dernières sont appliquées à plusieurs champs scientifiques et opérationnels et peuvent prendre en compte des aspects pluridisciplinaires.

Aujourd'hui, de nombreux auteurs sont incapables de justifier clairement leur choix pour une méthode plutôt qu'une autre et dans la majorité des cas, ils se contentent d'établir un état de l'art des avantages et inconvénients décrits dans la littérature. Les résultats de nos travaux prouvent qu'il est possible de sélectionner une méthode d'aide à la décision via un cahier des charges précis des caractéristiques demandées plutôt que de choisir une méthode en fonction des « avantages et inconvénients ». Nous pensons que ces avantages et inconvénients sont très subjectifs et que notre proposition est plus robuste puisqu'elle nécessite d'aller plus loin dans la compréhension et dans l'étude du fonctionnement des méthodes multicritères.

En second, notre méthodologie générale (cf. *Chapitre 3*) ainsi que nos critères et les échelles d'évaluation associées (cf. *Chapitre 4*) ont été présentés en toute transparence. Contrairement aux travaux issus de la littérature, nous présentons les panels d'experts qui ont participé à la construction, la réflexion et la pondération des critères. Nous avons également été transparents sur la construction des critères et des échelles de critères.

La définition des dimensions étudiées et la description des critères proposés ont apporté une vision claire des éléments à prendre en considération dans le cadre d'une gestion de déchets. Les dimensions étudiées ont été définies précisément puis traduites en critères où chacun fait l'objet d'un questionnement et de plusieurs réponses.

Pour finir, lors de la conférence de l'Association Francophone de Comptabilité (AFC) à Nantes, nous avons mesuré le caractère novateur de notre proposition. En effet, cet outil n'est pas un tableau de bord qui suit les évolutions des choix dans le temps, selon plusieurs indicateurs, dans l'objectif d'en tirer des conséquences, mais plutôt un outil qui propose de mesurer les performances des différentes possibilités de gestion au moment de prendre la décision. Il permet donc de donner au décideur opérationnel une vision « prospective » des conséquences positives et/ou négatives d'un choix éventuel sur les cinq dimensions étudiées. Cette aide lui

permet d'arbitrer en fonction de sa sensibilité entre plusieurs solutions tout en ayant une connaissance des conséquences de son choix et de le justifier sur l'ensemble des critères étudiés.

### Apports et contributions à l'entreprise

Côté entreprise, les travaux de recherche ont apporté plusieurs enseignements et un éclairage nouveau aux différentes entités travaillant sur la gestion des déchets. La revue bibliographique a porté à la connaissance du groupe Territoire et Économie Circulaire les modèles et les outils existants liés à la gestion des déchets. Nous avons également présenté un ensemble de méthodes multicritères d'aide à la décision que le groupe ne connaissait ou ne maîtrisait pas. En dernier lieu, nous avons énuméré et décrit les principaux critères étudiés dans la littérature en indiquant le contexte d'étude, le champ d'application et les limites d'utilisation. Nos travaux ont permis de mettre en chantier un développement possible d'un outil d'aide à la décision pour l'orientation des déchets à partir de la méthode AHP.

Pour la collecte des avis d'experts nous avons mis en place un questionnaire. Celui-ci est entièrement disponible et réutilisable pour collecter de nouveaux avis ou les mettre à jour. Les avis d'experts collectés ont permis de générer une pondération des critères dans chacune des dimensions ainsi que les éléments des échelles d'évaluation. Tous ces éléments sont intégralement restitués dans ce manuscrit et dans un fichier Excel sur lequel l'entreprise peut s'appuyer.

Dans le cadre des études menées sur les déchets amiantés, les déchets de bois, les sédiments et les granulats issus de la déconstruction, nous avons bâti plusieurs bases de données. Ces dernières sont disponibles, en partie, dans ce manuscrit, mais aussi dans un fichier Excel (.xlsx) et shapefile (.shapefile) pour une utilisation en SIG.

Une partie des cas d'étude a permis à l'équipe déchets de monter en compétence et notamment sur la valorisation des déchets de bois puisque ce flux de déchets n'avait pas encore été instruit par l'équipe déchets de la R&D d'EDF. L'ensemble des études de cas ont contribué à nourrir une réflexion globale avec des représentants de l'entreprise (R&D, exploitation, ingénierie) sur la méthodologie CLE et plus particulièrement à alimenter les bonnes questions qu'un gestionnaire de déchets doit se poser avant d'orienter un flux de déchets particulier.

L'outil et les résultats sur des cas d'étude ont été présentés au Groupe Déchet et Économie Circulaire (GDEC). Celui-ci est constitué de représentants des différents métiers de l'entreprise (ingénierie, exploitation, achat) et des différentes entités (Hydraulique, Thermique, Nucléaire). L'ensemble des résultats a été exposé par visioconférence à une trentaine de représentant des exploitations. De plus, un focus particulier sur les sédiments a mobilisé une vingtaine de personnes supplémentaires. Aujourd'hui, l'Hydraulique s'est montrée très intéressée et a demandé une application sur un barrage du Massif central. Cette entité a également commandé des formations liées à l'utilisation de l'outil.

Enfin, le dernier apport opérationnel concerne la livraison d'un outil informatique (Excel et VBA) pouvant comparer jusqu'à 5 installations pour un même déchet. Il permet également de faire des analyses de sensibilité liées aux avis d'experts et aux méthodes d'agrégation (cf. *Chapitre 3 — §3.6*). Il est également possible d'ajouter des avis d'experts complémentaires afin d'améliorer la robustesse des pondérations.

### Perspectives scientifiques

Les travaux menés peuvent donner lieu à plusieurs perspectives.

Les interviews menées auprès des experts de cotation ont également apporté plusieurs perspectives scientifiques dont notamment, augmenter le nombre de critères. Pour la partie environnementale, il s'agirait de l'ouvrir à des notions telles que la dangerosité, l'écotoxicité ou encore la consommation d'espace. Dans la partie territoriale, il serait également intéressant de compléter les critères territoriaux par :

- un critère sur la qualité du réseau routier par rapport aux transports de marchandises. Il s'agit ici de mesurer le gabarit du réseau routier (tonnage supporté et hauteur dans le cas de ponts ou de tunnels),
- un critère sur le temps de trajet. Ce dernier fait suite à l'étude de cas sur les granulats issus de la déconstruction de la centrale de Vitry-sur-Seine. En Ile-de-France, il est communément admis (ou plus pertinent) que les parcours ne se mesurent pas en kilomètres, mais plutôt en temps de trajet,
- un critère sur la qualité de l'emploi.

Au niveau des experts, ces derniers proviennent d'horizons professionnels différents : (i) académique (ii) industriel et (iii) institutionnel, il serait intéressant d'élargir le panel et d'analyser les pondérations en fonction de leur typologie afin de savoir si celle-ci reste stable si le panel est étendu.

A ce jour, nous avons jugé de manière arbitraire que tous les avis d'experts ont la même importance sans égard à leur typologie ou à leur expertise du domaine. Puisque les avis peuvent être différents, nous les avons pris en compte sans pondération afin de fabriquer un expert dit « moyen ». Il serait en revanche intéressant d'établir un poids à chacun des experts par dimension (cette perspective ne fonctionne que si les experts ont des avis divergents). Une des solutions possibles serait de mettre en place une échelle d'auto-évaluation dans les questionnaires, où l'expert interrogé pourrait alors se positionner sur une échelle comprise entre 1 et 10 par exemple.

Une vigilance particulière doit être accordée à la représentation des résultats afin d'en faciliter la lecture puisque c'est l'un des points essentiels pour leurs bonnes interprétations<sup>[279]</sup>. Cependant, malgré les différentes tentatives de représentation et les efforts que nous avons menés pour représenter graphiquement des résultats, la lecture de récents travaux montrent que c'est une discipline scientifique à part entière. Il serait enrichissant de poursuivre les travaux que nous avons menés pour représenter les résultats de la comparaison.

Une autre perspective d'analyse des résultats serait d'effectuer un examen *qualité — coût*. Il s'agira alors d'extraire le critère coût de chaque installation étudiée et de le comparer avec les notes finales sur chacune des dimensions et par installation<sup>52</sup>. Dans ce cas, la qualité est définie par les dimensions et/ou les critères. Le *Tableau 145* ci-dessous montre un exemple fictif d'une analyse *qualité — coût*.

*Tableau 145 : Exemple fictif d'une analyse qualité - coût (perspective)*

SCORE OBTENU SUR LE CRITERE COUT		NOTE FINALE OBTENUE SUR LES DIMENSIONS				
		ENVIRONNEMENTALE	ECONOMIQUE	TERRITORIALE	TECHNIQUE	REGLEMENTAIRE
Installation 1	50 €/tonne	0,56	0,60	0,321	0,45	0,68
SCORE OBTENU SUR LE CRITERE COUT		VARIATIONS RELATIVES DES NOTES FINALES DES DIMENSIONS PAR RAPPORT A LA PREMIERE INSTALLATION				
		ENVIRONNEMENTALE	ECONOMIQUE	TERRITORIALE	TECHNIQUE	REGLEMENTAIRE
Installation 2	15 €/tonne	- 0,35	- 0,15	+ 0,99	+ 0,10	- 0,15
Installation 3	35 €/tonne	+ 0,16	- 0,30	+ 0,248	+ 0,10	+ 0,25

Pour autant, la qualité d'une installation ne doit pas être uniquement réduite au coût (euros/tonnes). Il est également possible d'étudier des valeurs immatérielles. On parle alors d'analyse qualité/valeur. Le *Tableau 146* ci-après montre un exemple fictif d'une étude *qualité — valeur* en fonction de la dimension territoriale.

<sup>52</sup> Il est également possible d'effectuer l'analyse au niveau inférieur, c'est-à-dire en étudiant les gains directement sur les critères.

Tableau 146 : Exemple fictif d'une analyse qualité - valeur (perspective)

NOTE FINALE DE LA DIMENSION TERRITORIALE		NOTE FINALE OBTENUE SUR LES DIMENSIONS			
		ENVIRONNEMENTALE	ECONOMIQUE	TECHNIQUE	REGLEMENTAIRE
Installation 1	0,321	0,56	0,60	0,45	0,68
NOTE FINALE DE LA DIMENSION TERRITORIALE		VARIATIONS RELATIVES DES NOTES FINALES DES DIMENSIONS PAR RAPPORT A LA PREMIERE INSTALLATION			
		ENVIRONNEMENTALE	ECONOMIQUE	TECHNIQUE	REGLEMENTAIRE
Installation 2	0,99	- 0,35	- 0,15	+ 0,10	- 0,15
Installation 3	0,248	+ 0,16	- 0,30	+ 0,10	+ 0,25

Au niveau scientifique, l'un des verrous figurant sur le dossier initial CIFRE, qui devait être levé était : *Quel lien existe-t-il entre les données techniques, environnementales, économiques et spatiales pour évaluer et décider du meilleur scénario de valorisation de déchets ?*

Pour répondre à cette problématique, nous avons tenté une approche par Analyse en Composantes Principales (ACP), qui permet d'étudier des tableaux de données en croisant les dimensions (ou les critères) avec les résultats obtenus pour chacune d'entre elles. Cependant, nous n'avons pas assez de cas d'études par déchets et sur un même territoire pour utiliser la méthode et faire émerger des relations claires entre les données. Les études de déchets futures permettraient d'augmenter les données et de peut être pouvoir utiliser la méthode.

### Perspectives opérationnelles

De la même façon que pour les perspectives scientifiques, plusieurs éventualités « opérationnelles » ont été identifiées.

Au niveau de la recherche des installations, plusieurs bases de données ont été créées. Une interface SIG plus simple à utiliser, plus ergonomique et plus systématique serait nécessaire pour faciliter la recherche des installations à proximité des sites producteurs du groupe EDF et permettre la comparaison des installations par interrogation automatique des bases de données.

Les critères pourraient être détournés et être transformés en indicateurs pour du reporting extrafinancier. En effet, certains d'entre eux pourraient servir à étudier les performances des installations et du groupe EDF dans le cadre du suivi environnemental annuel. Les informations collectées et compilées pourraient aider à la rédaction du rapport extrafinancier du groupe. De plus, dans le cadre de la démarche de l'amélioration continue, il permettrait de prioriser les actions à mener puisque les experts ont donné un ordre d'importance aux critères à prendre en considération.

Tableau 147 : Exemple de transformation des critères en indicateur de suivi

CRITERES	INDICATEURS	ÉCHELLE DE MESURE	EXEMPLE D'OBJECTIF D'AMELIORATION
R <sub>1</sub> Respect de la hiérarchie de la gestion des déchets	Indicateur de suivi de la hiérarchie de gestion des déchets	Taux de réutilisation (%) Taux de recyclage (%) Taux de valorisation matière (%) Taux de valorisation énergétique (%) Taux d'élimination (%)	Fixer une augmentation des taux de recyclage et de valorisation et une diminution du taux d'élimination d'une année sur l'autre.
R <sub>3</sub> Principe de proximité	Indicateur de suivi du principe de proximité	Distance moyenne parcourue par tonne de déchets (il peut être décliné au niveau du groupe EDF, mais aussi par entités, ou par installations de production)	Diminuer la distance moyenne parcourue
Ec <sub>1</sub> Coût d'utilisation de l'installation	Indicateur de suivi du coût de gestion	Coût moyen de la gestion des déchets par tonne. Il peut être décliné par catégorie et sous-catégorie de déchets, pour le groupe EDF, mais aussi par entités, ou par installations de production)	Diminuer le coût moyen de gestion
Ter <sub>1</sub> Favoriser l'économie locale	Indicateur de suivi du niveau de proximité	Taux de gestion locale (%) Taux de gestion départementale (%) Taux de gestion régionale (%) Taux de gestion France (%)	Augmenter le taux de gestion locale et diminuer le taux de gestion hors France.

## Conclusions générales et perspectives

CRITERES	INDICATEURS	ÉCHELLE DE MESURE	EXEMPLE D'OBJECTIF D'AMELIORATION
	(administratif) utilisé	Taux de gestion hors France (%)	
Env2 Changement climatique	Indicateur de changement climatique	Quantité moyenne de CO <sub>2</sub> eq émis par tonne de déchets gérés. Il peut être décliné par catégorie et sous-catégorie de déchets, pour le groupe EDF, mais aussi par entités, ou par installations de production)	Diminuer la quantité de CO <sub>2</sub> eq émis pour la gestion des déchets

Au-delà des critères, de l'évaluation et de la comparaison des installations, la démarche proposée dans le cadre de ces travaux sera traduite sous la forme d'un guide technique opérationnel. Il s'agit de présenter les bonnes questions qu'un gestionnaire doit se poser pour orienter ses déchets en tenant compte des dimensions étudiées. L'utilisation de ce guide, étendue à d'autres flux de déchets principaux, permettra de consolider les démarches de développement durable mises en place par l'entreprise.



## BIBLIOGRAPHIE

---

- [1] M.-A. Marcoux, F. Olivier, F. Thery, et Réseau coopératif de recherches sur les déchets (France), *Déchets et économie circulaire: conditions d'intégration pour une valorisation en filières industrielles*. Paris: Lavoisier : Tec & Doc, 2016.
- [2] F. Thery, « Caractérisation des déchets en réponse aux critères d'acceptation des filières de valorisation : la clé du management vue par le producteur », *2013-03-01*, n° 323, p. 55-60, mars 2013.
- [3] B. ANGER, « Caractérisation de sédiments fins de retenues hydroélectriques en vue d'une orientation vers des filières de valorisation matière », p. 316, 2014.
- [4] C. Adoue, « Méthodologie d'identification de synergies éco-industrielles réalisables entre entreprises sur le territoire français », Thèse de doctorat, Université de Technologie de Troyes, 2004.
- [5] K. Winans, A. Kendall, et H. Deng, « The history and current applications of the circular economy concept », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 68, p. 825-833, févr. 2017.
- [6] CIRAIG, « Circular Economy : a critical literature review of concepts », oct. 2015.
- [7] C. Adoue, « Ecologie Industrielle », présenté à Formation à la recherche de synergies, 01-oct-2009.
- [8] A. Deboutière et L. Georgeault, « Quel potentiel d'emplois pour une économie circulaire ? », 2015.
- [9] D. Bourg et N. Buclet, « L'économie de fonctionnalité. Changer la consommation dans le sens du développement durable », *Futuribles*, n° 313, p. 27-38, nov. 2005.
- [10] N. Buclet, « L'économie de fonctionnalité entre éco-conception et territoire : une typologie », *Développement durable et territoires. Économie, géographie, politique, droit, sociologie*, n° Vol. 5, n°1, févr. 2014.
- [11] A. Heshmati, « A Review of the Circular Economy and its Implementation », 2016.
- [12] Y. Geng, J. Sarkis, S. Ulgiati, et P. Zhang, « Measuring China's Circular Economy », *Science*, vol. 339, n° 6127, p. 1526-1527, mars 2013.
- [13] UE, *Paquet «économie circulaire»: questions et réponses*. 2015.
- [14] Quantis et Sofies, « ECONOMIE CIRCULAIRE : CONCEPTS ET METHODES D'EVALUATION », Score LCA, 2014-02, oct. 2015.
- [15] A. Reichel, M. De Schoenmakere, J. Gillabel, et European Environment Agency, *Circular economy in Europe developing the knowledge base*. Luxembourg: Publications Office, 2016.
- [16] B. Pierret, « L'économie circulaire, état des lieux et perspectives », MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DE L'ÉNERGIE, 009548-06, nov. 2014.
- [17] Meadows et H. Donella, *The Limits to growth; a report for the Club of Rome's project on the predicament of mankind*. 1972.
- [18] D. H. Meadows et Club of Rome, Éd., *The Limits to growth; a report for the Club of Rome's project on the predicament of mankind*. New York: Universe Books, 1972.
- [19] ADEME, « Economie circulaire : notions », 2012.
- [20] A. Allesch et P. H. Brunner, « Assessment methods for solid waste management: A literature review », *Waste Management & Research*, p. 0734242X14535653, 2014.
- [21] J.-B. Bahers, « Dynamiques des filières de récupération-recyclage et écologie territoriale: l'exemple de la filière de traitement des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) en Midi-Pyrénées », Université Toulouse le Mirail-Toulouse II, 2012.
- [22] G. Bertolini et M. Brakez, « Gestion des déchets, innovations et territoires », *Marché et organisations*, n° 7, p. 92-113, nov. 2012.
- [23] SICTOM, « Traitement des déchets ».
- [24] Eurostat, « Statistiques sur les déchets - Statistics Explained », *Statistiques sur les déchets*. [En ligne]. Disponible sur: [http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Waste\\_statistics/fr](http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Waste_statistics/fr). [Consulté le: 25-août-2016].
- [25] ADEME, « Déchets : chiffres clés », 2016.
- [26] UE, *Directive 2008/98/CE*. 2008.



- [27] UE, *Directive 75/439/CEE*. 1975.
- [28] JORF, *LOI n° 2010-788 du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement*. 2010.
- [29] MEEM, « Economie circulaire, les avancées de la loi de transition énergétique pour la croissance verte. Plan de réduction et de valorisation des déchets 2025 », déc. 2016.
- [30] JORF, *Décret n° 2016-288 du 10 mars 2016 portant diverses dispositions d'adaptation et de simplification dans le domaine de la prévention et de la gestion des déchets*. 2016.
- [31] V. Aurez, L. Georgeault, W. R. Stahel, et D. Bourg, *Économie circulaire: système économique et finitude des ressources*. Louvain-la Neuve: De Boeck supérieur, 2016.
- [32] JORF, *LOI n° 2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement*. 2009.
- [33] JORF, *LOI n° 2015-991 du 7 août 2015 portant nouvelle organisation territoriale de la République*. 2015.
- [34] RTE, « Données en énergie », *RTE France*, 21-avr-2016. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.rte-france.com/fr/eco2mix/donnees-en-energie>. [Consulté le: 09-déc-2016].
- [35] EDF, « Indicateurs de performance financière et extra-financière 2015 », 2016. [En ligne]. Disponible sur: [https://www.edf.fr/sites/default/files/contrib/groupe-edf/responsable-et-engage/rapports-et-indicateurs/indicateurs-developpement-durable/edf2015\\_indicateursperformance\\_vf.pdf](https://www.edf.fr/sites/default/files/contrib/groupe-edf/responsable-et-engage/rapports-et-indicateurs/indicateurs-developpement-durable/edf2015_indicateursperformance_vf.pdf). [Consulté le: 10-févr-2017].
- [36] EDF, « EDF - Performance », 2015.
- [37] A. Vitorino de Souza Melaré, S. Montenegro González, K. Faceli, et V. Casadei, « Technologies and decision support systems to aid solid-waste management: a systematic review », *Waste Management*, vol. 59, p. 567-584, janv. 2017.
- [38] T. Rogauze, *Gestion des déchets: réglementation, organisation, mise en œuvre*. Paris: Ellipses, 2015.
- [39] R. Moletta, Éd., *Le traitement des déchets*. Paris: Editions Tec & doc, 2009.
- [40] D. Nouri, M. R. Sabour, et M. GhanbarzadehLak, « Industrial solid waste management through the application of multi-criteria decision-making analysis: a case study of Shamsabad industrial complexes », *Journal of Material Cycles and Waste Management*, sept. 2016.
- [41] C. Achillas, N. Moussiopoulos, A. Karagiannidis, G. Baniyas, et G. Perkoulidis, « The use of multi-criteria decision analysis to tackle waste management problems: a literature review », *Waste Management & Research*, vol. 31, n° 2, p. 115–129, 2013.
- [42] L. M. G. Coelho, L. C. Lange, et H. M. Coelho, « Multi-criteria decision making to support waste management: A critical review of current practices and methods », *Waste Management & Research*, p. 0734242X16664024, 2016.
- [43] S. Cobo, A. Dominguez-Ramos, et A. Irabien, « From linear to circular integrated waste management systems: A review of methodological approaches », *Resources, Conservation and Recycling*, 2017.
- [44] A. Pires, G. Martinho, et N.-B. Chang, « Solid waste management in European countries: A review of systems analysis techniques », *Journal of Environmental Management*, vol. 92, n° 4, p. 1033-1050, avr. 2011.
- [45] JORF, *LOI n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte - Article 70*. 2015.
- [46] JORF, *Code de l'environnement - Article L541-1*, vol. L541-1. 2015.
- [47] B. Debray, « Systèmes d'aide à la décision pour le traitement des déchets industriels spéciaux », INSA de Lyon, 1997.
- [48] S. Lupton, *Économie des déchets: une approche institutionnaliste*. Bruxelles: De Boeck, 2011.
- [49] C. Verdure, *La conciliation des enjeux économiques et environnementaux en droit de l'Union européenne: analyse appliquée au secteur des déchets*. Issy-les-Moulineaux: LGDJ, 2014.
- [50] M. 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 », Rennes 1, 2013.
- [51] G. Massard, « Les symbioses industrielles une nouvelle stratégie pour l'amélioration de l'utilisation des ressources matérielles et énergétiques par les activités économique », Université de Lausanne, Lausanne, 2011.

- [52] G. Rojo, « La gestion dynamique des déchets (GDD): élaboration d'une approche intégrée d'aide à la décision visant à soutenir une gestion systémique et évolutive des déchets », Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2009.
- [53] N.-B. Chang et A. Pires, *Sustainable Solid Waste Management: A Systems Engineering Approach*. John Wiley & Sons, 2015.
- [54] N.-B. Chang, A. Pires, et G. Martinho, « Empowering Systems Analysis for Solid Waste Management: Challenges, Trends, and Perspectives », *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, vol. 41, n° 16, p. 1449-1530, août 2011.
- [55] G. Finnveden, A. Björklund, Å. Moberg, T. Ekvall, et Å. Moberg, « Environmental and economic assessment methods for waste management decision-support: possibilities and limitations », *Waste Management & Research*, vol. 25, n° 3, p. 263-269, juin 2007.
- [56] K. Angelakoglou et G. Gaidajis, « A review of methods contributing to the assessment of the environmental sustainability of industrial systems », *Journal of Cleaner Production*, vol. 108, p. 725-747, déc. 2015.
- [57] G. Finnveden et Å. Moberg, « Environmental systems analysis tools – an overview », *Journal of Cleaner Production*, vol. 13, n° 12, p. 1165-1173, oct. 2005.
- [58] M. W. Maier, « Architecting principles for systems-of-systems », *Systems Engineering*, vol. 1, n° 4, p. 267-284, 1998.
- [59] É. PÉCHENART et A. ROQUESALANE, « SimaPro : logiciel d'analyse de cycle de vie ». Techniques de l'Ingénieur, 10-oct-2014.
- [60] J. Winkler et B. Bilitewski, « Comparative evaluation of life cycle assessment models for solid waste management », *Waste Management*, vol. 27, n° 8, p. 1021-1031, janv. 2007.
- [61] O. Eriksson et M. Bisailon, « Multiple system modelling of waste management », *Waste Management*, vol. 31, n° 12, p. 2620-2630, déc. 2011.
- [62] A. . Morrissey et J. Browne, « Waste management models and their application to sustainable waste management », *Waste Management*, vol. 24, n° 3, p. 297-308, janv. 2004.
- [63] E. C. Gentil *et al.*, « Models for waste life cycle assessment: Review of technical assumptions », *Waste Management*, vol. 30, n° 12, p. 2636-2648, déc. 2010.
- [64] A. Boldrin, T. L. Neidel, A. Damgaard, G. S. Bhandar, J. Møller, et T. H. Christensen, « Modelling of environmental impacts from biological treatment of organic municipal waste in EASEWASTE », *Waste Management*, vol. 31, n° 4, p. 619-630, avr. 2011.
- [65] E. C. Gentil, *Life-cycle modelling of waste management in Europe: tools, climate change and waste prevention : PhD thesis*. DTU Environment, Technical University of Denmark, 2011.
- [66] J. den Boer, E. den Boer, et J. Jager, « LCA-IWM: A decision support tool for sustainability assessment of waste management systems », *Waste Management*, vol. 27, n° 8, p. 1032-1045, janv. 2007.
- [67] AFNOR, « NF EN ISO 14040 - Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Principes et cadre », 2006.
- [68] R. Hiederer, European Commission, Joint Research Centre, et Institute for Environment and Sustainability, *International reference life cycle data system (ILCD) handbook: general guide for life cycle assessment: provisions and action steps*. Luxembourg: Publications Office, 2011.
- [69] L. Aissani, « Intégration des paramètres spatio-temporels et des risques d'accident à l'analyse du cycle de vie: application à la filière hydrogène énergie et à la filière essence », Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2008.
- [70] J. Villeneuve *et al.*, « Process-based analysis of waste management systems: A case study », *Waste Management*, vol. 29, n° 1, p. 2-11, janv. 2009.
- [71] F. R. McDougall et P. White, Éd., *Integrated solid waste management: a life cycle inventory*, 2nd ed. Oxford, UK ; Malden, MA: Blackwell Science, 2001.
- [72] H. Asefi et S. Lim, « A novel multi-dimensional modeling approach to integrated municipal solid waste management », *Journal of Cleaner Production*, vol. 166, p. 1131-1143, nov. 2017.

- [73] S. N. M. Menikpura, J. Sang-Arun, et M. Bengtsson, « Integrated Solid Waste Management: an approach for enhancing climate co-benefits through resource recovery », *Journal of Cleaner Production*, vol. 58, p. 34-42, nov. 2013.
- [74] A. Björklund, M. Dalemo, et U. Sonesson, « Evaluating a municipal waste management plan using ORWARE », *Journal of Cleaner Production*, vol. 7, n° 4, p. 271–280, 1999.
- [75] O. Eriksson *et al.*, « ORWARE—a simulation tool for waste management », *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 36, n° 4, p. 287–307, 2002.
- [76] U. Sonesson, M. Dalemo, K. Mingarini, et H. Jönsson, « ORWARE—a simulation model for organic waste handling systems. Part 2: Case study and simulation results », *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 21, n° 1, p. 39–54, 1997.
- [77] Swedis University of Agricultural Sciences, « Modelling of the compost and transport process in the orware simulation model », 214, 1996.
- [78] T. H. Christensen *et al.*, « EXPERIENCES ON THE USE OF LCA-MODELING (EASEWASTE) IN WASTE MANAGEMENT », 2006.
- [79] CIRAIG, « L'ACV : un outil d'aide à la décision en GMR », févr. 2008.
- [80] J. Miliūte et J. Kazimieras Staniškis, « Application of life-cycle assessment in optimisation of municipal waste management systems: the case of Lithuania », *Waste Management & Research*, vol. 28, n° 4, p. 298-308, avr. 2010.
- [81] M. D. Bovea, V. Ibáñez-Forés, A. Gallardo, et F. J. Colomer-Mendoza, « Environmental assessment of alternative municipal solid waste management strategies. A Spanish case study », *Waste Management*, vol. 30, n° 11, p. 2383-2395, nov. 2010.
- [82] L. Hénault-Ethier, J.-P. Martin, et J. Housset, « A dynamic model for organic waste management in Quebec (D-MOWIQ) as a tool to review environmental, societal and economic perspectives of a waste management policy », *Waste Management*, vol. 66, p. 196-209, août 2017.
- [83] P. H. Brunner et H. Rechberger, *Practical handbook of material flow analysis*. Boca Raton, FL: CRC/Lewis, 2004.
- [84] P. Repellin, B. Duret, et S. Barles, « Comptabilite des flux de matiere. », Commissariat général au développement durable, Guide méthodologique, juin 2014.
- [85] Y. Geng, J. Fu, J. Sarkis, et B. Xue, « Towards a national circular economy indicator system in China: an evaluation and critical analysis », *Journal of Cleaner Production*, vol. 23, n° 1, p. 216-224, mars 2012.
- [86] L. Zaccariello, R. Cremiato, et M. L. Mastellone, « Evaluation of municipal solid waste management performance by material flow analysis: Theoretical approach and case study », *Waste Management & Research*, vol. 33, n° 10, p. 871–885, 2015.
- [87] A. Bierer, U. Götze, L. Meynerts, et R. Sygulla, « Integrating life cycle costing and life cycle assessment using extended material flow cost accounting », *Journal of Cleaner Production*, vol. 108, p. 1289-1301, déc. 2015.
- [88] D. A. Turner, I. D. Williams, et S. Kemp, « Combined material flow analysis and life cycle assessment as a support tool for solid waste management decision making », *Journal of Cleaner Production*, vol. 129, p. 234-248, août 2016.
- [89] R. Chompu-inwai, B. Jaimjit, et P. Premsurayanunt, « A combination of Material Flow Cost Accounting and design of experiments techniques in an SME: the case of a wood products manufacturing company in northern Thailand », *Journal of Cleaner Production*, vol. 108, Part B, p. 1352-1364, déc. 2015.
- [90] E. Guenther, C. Jasch, M. Schmidt, B. Wagner, et P. Ilg, « Material Flow Cost Accounting – looking back and ahead », *Journal of Cleaner Production*, vol. 108, p. 1249-1254, déc. 2015.
- [91] F. Sulong, M. Sulaiman, et M. A. Norhayati, « Material Flow Cost Accounting (MFCA) enablers and barriers: the case of a Malaysian small and medium-sized enterprise (SME) », *Journal of Cleaner Production*, vol. 108, Part B, p. 1365-1374, déc. 2015.
- [92] M. Schmidt, « The interpretation and extension of Material Flow Cost Accounting (MFCA) in the context of environmental material flow analysis », *Journal of Cleaner Production*, vol. 108, p. 1310-1319, déc. 2015.
- [93] P. Gluch et H. Baumann, « The life cycle costing (LCC) approach: a conceptual discussion of its usefulness for environmental decision-making », *Building and Environment*, vol. 39, n° 5, p. 571-580, mai 2004.

- [94] R. Alard, P. Bremen, J. Oehmen, et C. Schneider, « Total Cost of Ownership Considerations in Global Sourcing Processes », in *IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems*, 2009, p. 491–498.
- [95] M. Gervais, Y. Levant, et C. Ducrocq, « Time-driven activity-based costing (TDABC): An initial appraisal through a longitudinal case study », *Journal of Applied Management Accounting Research*, vol. 8, n° 2, p. 1, 2010.
- [96] ADEME, « Coût complet des déchets : méthodes MFCA », 2014. .
- [97] S. Schaltegger et D. Zvezdov, « Expanding material flow cost accounting. Framework, review and potentials », *Journal of Cleaner Production*, vol. 108, Part B, p. 1333-1341, déc. 2015.
- [98] K. Kokubu et H. Kitada, « Material flow cost accounting and existing management perspectives », *Journal of Cleaner Production*, vol. 108, Part B, p. 1279-1288, déc. 2015.
- [99] UNEP, « Towards a Life Cycle Sustainability Assessment », 2011.
- [100] W. Kloepffer, « Life cycle sustainability assessment of products: (with Comments by Helias A. Udo de Haes, p. 95) », *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 13, n° 2, p. 89-95, mars 2008.
- [101] D. Jasinski, J. Meredith, et K. Kirwan, « A comprehensive review of full cost accounting methods and their applicability to the automotive industry », *Journal of Cleaner Production*, vol. 108, p. 1123-1139, déc. 2015.
- [102] D. Sartori et Europäische Kommission, Éd., *Guide to cost-benefit analysis of investment projects: economic appraisal tool for cohesion policy 2014 - 2020*, Dec. 2014. Luxembourg: Publ. Office of the Europ. Union, 2015.
- [103] Z. Zhou, Y. Tang, Y. Chi, M. Ni, et A. Buekens, « Waste-to-energy: A review of life cycle assessment and its extension methods », *Waste Management & Research*, p. 0734242X17730137, 2017.
- [104] J. Sundberg, P. Gipperth, et C.-O. Wene, « A systems approach to municipal solid waste management: A pilot study of Göteborg », *Waste Management & Research*, vol. 12, n° 1, p. 73-91, févr. 1994.
- [105] Y. KAWAUCHI et M. RAUSAND, « LCC.pdf », juin 1999.
- [106] V. Martinez-Sanchez, M. A. Kromann, et T. F. Astrup, « Life cycle costing of waste management systems: Overview, calculation principles and case studies », *Waste Management*, vol. 36, p. 343-355, févr. 2015.
- [107] A. Ciroth, D. Hunkeler, W. Klöpffer, T. Swarr, et H. Peesonen, « Life Cycle Costing—a Code of Practice. Key messages and critical evaluation », *LCA XI Chicago*, 2011.
- [108] G. Rebitzer et D. Hunkeler, « Life cycle costing in LCM: ambitions, opportunities, and limitations », *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 8, n° 5, p. 253–256, 2003.
- [109] S. Martinez, M. Hassanzadeh, Y. Bouzidi, et N. Antheaume, « Life Cycle Costing Assessment with both Internal and External Costs Estimation », in *Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing*, J. Hesselbach et C. Herrmann, Éd. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, p. 641-646.
- [110] N. Antheaume, « L'évaluation des coûts externes. De la théorie à la pratique. Interrogation sur l'évolution de la comptabilité sociale et sur sa place parmi d'autres systèmes d'information au sein de l'entreprise », p. 344, 1992.
- [111] R. Heijungs, E. Settanni, et J. Guinée, « Toward a computational structure for life cycle sustainability analysis: unifying LCA and LCC », *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 18, n° 9, p. 1722-1733, nov. 2013.
- [112] G. A. Norris, « Integrating life cycle cost analysis and LCA », *The international journal of life cycle assessment*, vol. 6, n° 2, p. 118–120, 2001.
- [113] V. Meunier et É. Marsden, *Analyse coût-bénéfices: guide méthodologique*. FonCSI, 2009.
- [114] BRGM, « Utilisation des outils d'aide à la décision dans la gestion des Mégasites », BRGM/RP-55223-FR, 2006.
- [115] A. Higashida, K. Kokubu, et A. Shinohara, « Introducing material flow cost accounting and creating visibility—analyzing MFCA in practice based on a longitudinal case study », in *Proceedings of the seventh asia pacific interdisciplinary research in accounting conference*, 2013, p. 26–28.
- [116] ISO, « ISO 14051:2011 - Environmental management -Material flow cost accounting - General framework », sept. 2011.
- [117] J. Hyršlová, M. Vágner, et J. Palásek, « Material Flow Cost Accounting (MfCA) – Tool for the Optimization of Corporate Production Processes », *Business, Management and Education*, vol. 9, n° 1, p. 5-18, juin 2011.
- [118] D. Sabaei, J. Erkoyncu, et R. Roy, « A Review of Multi-criteria Decision Making Methods for Enhanced Maintenance Delivery », *Procedia CIRP*, vol. 37, p. 30-35, 2015.

- [119] A. Kumar *et al.*, « A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 69, p. 596-609, mars 2017.
- [120] T. L. Saaty et H. Gholamnezhad, « High-level nuclear waste management: analysis of options », *Environment and Planning B: Planning and Design*, vol. 9, n° 2, p. 181–196, 1982.
- [121] A. Hammami, « Modélisation technico-économique d'une chaîne logistique dans une entreprise réseau », Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne; Université Laval, 2003.
- [122] D. Ayadi, « Optimisation multicritère de la fiabilité: application du modèle de goal programming avec les fonctions de satisfactions dans l'industrie de traitement de gaz », Université d'Angers, 2010.
- [123] M. Velasquez et P. T. Hester, « An analysis of multi-criteria decision making methods », *International Journal of Operations Research*, vol. 10, n° 2, p. 56–66, 2013.
- [124] N. H. Zardari, K. Ahmed, S. M. Shirazi, et Z. B. Yusop, « Literature Review », in *Weighting Methods and their Effects on Multi-Criteria Decision Making Model Outcomes in Water Resources Management*, Cham: Springer International Publishing, 2015, p. 7-67.
- [125] N. Roussat, « Optimisation des stratégies de gestion du contenu «matières premières et énergie» des déchets produits et utilisés sur un territoire urbanisé », Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2007.
- [126] B. Roy, *Méthodologie multicritère d'aide à la décision*. Paris: Economica, 1985.
- [127] A. Guitouni et J.-M. Martel, « Tentative guidelines to help choosing an appropriate MCDA method », *European Journal of Operational Research*, vol. 109, n° 2, p. 501-521, sept. 1998.
- [128] A. Guitouni, J.-M. Martel, et P. Vincke, *Un cadre de référence pour le choix d'une procédure d'agrégation multicritère*. Faculté des sciences de l'administration de l'Université Laval, Direction de la recherche, 1999.
- [129] T. L. Saaty, « A scaling method for priorities in hierarchical structures », *Journal of Mathematical Psychology*, vol. 15, n° 3, p. 234-281, juin 1977.
- [130] T. L. Saaty, « How to make a decision: the analytic hierarchy process », *European journal of operational research*, vol. 48, n° 1, p. 9–26, 1990.
- [131] T. L. Saaty et L. G. Vargas, « Modeling behavior in competition: The analytic hierarchy process », *Applied Mathematics and Computation*, vol. 16, n° 1, p. 49–92, 1985.
- [132] T. L. Saaty, « Decision making with the analytic hierarchy process », *International journal of services sciences*, vol. 1, n° 1, p. 83–98, 2008.
- [133] M. Mammeri, « Une approche d'aide multicritère à la décision pour l'évaluation du confort dans les trains: construction d'un modèle d'évaluation », Université Paris Dauphine-Paris IX, 2013.
- [134] T. Boukherroub, A. Guinet, et J. Fondrevelle, « Méthode d'aide à la décision multicritères pour l'internalisation/externalisation" durable" », in *9th International Conference on Modeling, Optimization & SIMulation*, 2012.
- [135] M. C. BEKHTARI, « Les méthodes multi-critères pour analyser les aptitudes des terres agricoles : le cas du blé tendre en Languedoc-Rousillon analysé avec la méthode AHP. », sept-2015.
- [136] J. Kim, Y. Hwang, et K. Park, « An assessment of the recycling potential of materials based on environmental and economic factors; case study in South Korea », *Journal of Cleaner Production*, vol. 17, n° 14, p. 1264-1271, sept. 2009.
- [137] M. A. A. Samah, L. A. Manaf, A. Z. Aris, et W. N. A. Sulaiman, « Solid waste management: analytical hierarchy process (AHP) application of selecting treatment technology in Sepang Municipal council, Malaysia », *Current World Environment*, vol. 6, n° 1, p. 01–16, 2011.
- [138] M. Bonnin, « Optimisation multicritère pour une gestion globale des ressources: application au cycle du cuivre en France », 2013.
- [139] ADEME, « Catalogue des Indicateurs de suivi des Plans d'Élimination des Déchets Ménagers et Assimilés ». 2010.
- [140] I.-S. Antonopoulos, G. Perkoulidis, D. Logothetis, et C. Karkanias, « Ranking municipal solid waste treatment alternatives considering sustainability criteria using the analytical hierarchical process tool », *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 86, p. 149-159, mai 2014.



- [141] R. Briere, « Etude ACV des chantiers de démolition en vue de la préservation des ressources: focus sur les procédés de transport et de décharge », Université Paris-Est, 2016.
- [142] S. S. Chung et C. S. Poon, « Evaluating waste management alternatives by the multiple criteria approach », *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 17, n° 3, p. 189–210, 1996.
- [143] E. Gomez, D. A. Rani, C. R. Cheeseman, D. Deegan, M. Wise, et A. R. Boccaccini, « Thermal plasma technology for the treatment of wastes: A critical review », *Journal of Hazardous Materials*, vol. 161, n° 2–3, p. 614-626, janv. 2009.
- [144] D. De Clercq, Z. Wen, et F. Fan, « Performance evaluation of restaurant food waste and biowaste to biogas pilot projects in China and implications for national policy », *Journal of Environmental Management*, vol. 189, p. 115-124, mars 2017.
- [145] Z. A. Coventry, R. Tize, et A. T. Karunanithi, « Comparative life cycle assessment of solid waste management strategies », *Clean Technologies and Environmental Policy*, vol. 18, n° 5, p. 1515-1524, juin 2016.
- [146] A. Emery, A. Davies, A. Griffiths, et K. Williams, « Environmental and economic modelling: A case study of municipal solid waste management scenarios in Wales », *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 49, n° 3, p. 244-263, janv. 2007.
- [147] J. Hokkanen et P. Salminen, « Choosing a solid waste management system using multicriteria decision analysis », *European journal of operational research*, vol. 98, n° 1, p. 19–36, 1997.
- [148] N. Roussat, C. Dujet, et J. Méhu, « Choosing a sustainable demolition waste management strategy using multicriteria decision analysis », *Waste Management*, vol. 29, n° 1, p. 12-20, janv. 2009.
- [149] M. Coronado, E. Dosal, A. Coz, J. R. Viguri, et A. Andrés, « 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*, vol. 2, n° 2, p. 209-225, mai 2011.
- [150] M. A. Babalola, « A Multi-Criteria Decision Analysis of Waste Treatment Options for Food and Biodegradable Waste Management in Japan », *Environments*, vol. 2, n° 4, p. 471-488, oct. 2015.
- [151] A. Chabuk, N. Al-Ansari, H. M. Hussain, S. Knutsson, et R. Pusch, « Landfill site selection using geographic information system and analytical hierarchy process: A case study Al-Hillah Qadhaa, Babylon, Iraq », *Waste Management & Research*, vol. 34, n° 5, p. 427–437, 2016.
- [152] O. E. Demesouka, A. P. Vavatsikos, et K. P. Anagnostopoulos, « Suitability analysis for siting MSW landfills and its multicriteria spatial decision support system: Method, implementation and case study », *Waste Management*, vol. 33, n° 5, p. 1190-1206, mai 2013.
- [153] M.-L. Hung, H. Ma, et W.-F. Yang, « A novel sustainable decision making model for municipal solid waste management », *Waste Management*, vol. 27, n° 2, p. 209-219, janv. 2007.
- [154] H. Y. Yap et J. D. Nixon, « A multi-criteria analysis of options for energy recovery from municipal solid waste in India and the UK », *Waste Management*, vol. 46, p. 265-277, déc. 2015.
- [155] M. Z. Hauschild *et al.*, « Identifying best existing practice for characterization modeling in life cycle impact assessment », *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 18, n° 3, p. 683-697, mars 2013.
- [156] D. Hanan, S. Burnley, et D. Cooke, « A multi-criteria decision analysis assessment of waste paper management options », *Waste Management*, vol. 33, n° 3, p. 566-573, mars 2013.
- [157] AMORCE, « Indicateurs de coûts et de performance de la gestion des déchets organiques », oct. 2011.
- [158] R. Oyoo, R. Leemans, et A. P. Mol, « The determination of an optimal waste management scenario for Kampala, Uganda », *Waste Management & Research*, vol. 31, n° 12, p. 1203–1216, 2013.
- [159] B. Vučijak, S. M. Kurtagić, et I. Silajdžić, « Multicriteria decision making in selecting best solid waste management scenario: a municipal case study from Bosnia and Herzegovina », *Journal of Cleaner Production*, vol. 130, p. 166-174, sept. 2016.
- [160] G. Baniyas, C. Achillas, C. Vlachokostas, N. Moussiopoulos, et S. Tarsenis, « Assessing multiple criteria for the optimal location of a construction and demolition waste management facility », *Building and Environment*, vol. 45, n° 10, p. 2317-2326, oct. 2010.
- [161] C. Gomes, K. Nunes, L. Helenaxavier, R. Cardoso, et R. Valle, « Multicriteria decision making applied to waste recycling in Brazil☆ », *Omega*, vol. 36, n° 3, p. 395-404, juin 2008.

- [162] S. Ferigutti, « Approche: méthodique pour la selection des technologies de traitement des déchets dangereux pour un centre de transfert », juin 1998.
- [163] D. Bollinger et J. Pictet, « Multiple criteria decision analysis of treatment and land-filling technologies for waste incineration residues », *Omega*, vol. 36, n° 3, p. 418-428, juin 2008.
- [164] R. Hermann, R. J. Baumgartner, S. Vorbach, A. Ragosnig, et R. Pomberger, « Evaluation and selection of decision-making methods to assess landfill mining projects », *Waste Management & Research*, vol. 33, n° 9, p. 822–832, 2015.
- [165] Orée *et al.*, « Module 2 Étudier la faisabilité des synergies “éco-industrielles” », *comethe.org*, 2011. [En ligne]. Disponible sur: [http://www.comethe.org/index.php?option=com\\_content&view=article&id=90&Itemid=65](http://www.comethe.org/index.php?option=com_content&view=article&id=90&Itemid=65).
- [166] OREE, « Orée - Page d'accueil ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.referentiel-ellipse-eit.org/>. [Consulté le: 11-mai-2017].
- [167] MEFI, « Thésaurus-Bercy V1 : Référentiel français de mesure de la valeur extra-financière et financière du capital immatériel des entreprises », V1, oct. 2011.
- [168] R. Allais, « Transition systémique pour un développement durable: entre conception et territoire », Troyes, 2015.
- [169] M. E. Porter, « The Five Competitive Forces That Shape Strategy », *Harvard business Review*, p. 19, 2010.
- [170] E. Madadian, L. Amiri, et M. A. Abdoli, « Application of analytic hierarchy process and multicriteria decision analysis on waste management: A case study in iran », *Environmental Progress & Sustainable Energy*, vol. 32, n° 3, p. 810-817, oct. 2013.
- [171] F. Aissanou, « Décisions multicritères dans les réseaux de télécommunications autonomes », Institut National des Télécommunications, 2012.
- [172] S. Hajkowicz et A. Higgins, « A comparison of multiple criteria analysis techniques for water resource management », *European Journal of Operational Research*, vol. 184, n° 1, p. 255-265, janv. 2008.
- [173] L. HENRIET, « Systèmes d'évaluation et de classification multicritères pour l'aide à la décision : Construction de modèles et procédures d'affectation », Université de Paris Dauphine - Paris IX, 2010.
- [174] M. PERSONNE, « Contribution à la méthodologie d'intégration de l'environnement dans les PME-PMI : Évaluation des performances environnementales », INSA de Lyon, 1998.
- [175] S. S. Stevens, « On the Theory of Scales of Measurement », *Science*, vol. 103, n° 2684, p. 677-680, juin 1946.
- [176] A. Soltani, K. Hewage, B. Reza, et R. Sadiq, « Multiple stakeholders in multi-criteria decision-making in the context of Municipal Solid Waste Management: A review », *Waste Management*, vol. 35, p. 318-328, janv. 2015.
- [177] E. Forman et K. Peniwati, « Aggregating individual judgments and priorities with the analytic hierarchy process », *European journal of operational research*, vol. 108, n° 1, p. 165–169, 1998.
- [178] B. Blagojevic, B. Srdjevic, Z. Srdjevic, et T. Zoranovic, « Heuristic aggregation of individual judgments in AHP group decision making using simulated annealing algorithm », *Information Sciences*, vol. 330, p. 260-273, févr. 2016.
- [179] Q. Dong et O. Cooper, « A peer-to-peer dynamic adaptive consensus reaching model for the group AHP decision making », *European Journal of Operational Research*, vol. 250, n° 2, p. 521-530, avr. 2016.
- [180] B. Srdjevic, Z. Srdjevic, B. Blagojevic, et K. Suvocarev, « A two-phase algorithm for consensus building in AHP-group decision making », *Applied Mathematical Modelling*, vol. 37, n° 10-11, p. 6670-6682, juin 2013.
- [181] S. Zahir, « Geometry of decision making and the vector space formulation of the analytic hierarchy process », *European Journal of Operational Research*, vol. 112, n° 2, p. 373–396, 1999.
- [182] B. Srdjevic et Z. Srdjevic, « Synthesis of individual best local priority vectors in AHP-group decision making », *Applied Soft Computing*, vol. 13, n° 4, p. 2045-2056, avr. 2013.
- [183] G. Tremblay, V. Lephart, Québec (Province), et Service des matières résiduelles, *Hiérarchie des modes de gestion des matières résiduelles et reconnaissance d'opérations de traitement en tant que valorisation énergétique*. Québec: Développement durable, environnement et parcs Québec, Direction des matières résiduelles et des lieux contaminés, Service des matières résiduelles, 2010.
- [184] J. Méry, R. Mtibaa, et A. Torre, « Dynamiques de proximité et gestion des déchets: application à la mise en décharge », in *6èmes journées de la proximité, le temps des débats*, 2009, p. 8–p.
- [185] IGD et AMF, « Charte des services publics locaux », 2002. .



- [186] F. Laurent, « Optimisation fonctionnelle et spatiale de scénarios de méthanisation centralisée selon une approche systémique territoriale couplée à l'analyse du cycle de vie », Université de Rennes 1, 2015.
- [187] D. B. FERNANDEZ, I. PETIT, A. LANCINI, et others, *L'Economie Circulaire: Quelles Mesures De La Performance Economique, Environnementale Et Sociale*. Paris, 2014.
- [188] BRGM, « Evaluation de scénarios de gestion des déchets du secteur sud-est de systom à l'horizon 2020 », BRGM/RP-57526-FR, 2009.
- [189] L. Gregory, « McDonald's Five Forces Analysis (Porter's Model) », *Panmore Institute*, 06-oct-2015. .
- [190] S. BYLYKBASHI, « L'intensité concurrentielle : proposition d'une échelle bidimensionnelle de mesure ». 2009.
- [191] W. Kiechel, *The lords of strategy: the secret intellectual history of the new corporate world*. Boston, Mass: Harvard Business Press, 2010.
- [192] M. Visseyrias, « McDo-Burger King, la guéguerre publicitaire », *Le Figaro*, 26-févr-2016.
- [193] INSEE, « Les entreprises créées en 2010 », *Statistiques*, 2017. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.insee.fr/fr/statistiques>.
- [194] Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer, « Le recyclage des matières premières [L'essentiel sur..., Environnement, Gestion et utilisation des ressources] : Observation et statistiques », 21-déc-2012. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/lessentiel/ar/299/1161/recyclage-matieres-premieres.html>.
- [195] RECORD, « Mise en place d'une approche multicritères pour le choix d'une filière de valorisation matière/énergie des déchets plastiques : avis d'experts », 2006.
- [196] C. TAVIAN et G. FRIDERICH, « Agenda 21 : contexte et concept - Référentiel Agenda 21 », *Techniques de l'ingénieur. Environnement*, oct. 2013.
- [197] O. Bouba-Olga et M. Grossetti, « Socio-économie de proximité », *Revue d'Économie Régionale & Urbaine*, vol. octobre, n° 3, p. 311-328, janv. 2010.
- [198] A. Torre et B. Zuindeau, « Les apports de l'économie de la proximité aux approches environnementales : inventaire et perspectives », *Natures Sciences Sociétés*, vol. 17, n° 4, p. 349-360, janv. 2012.
- [199] Local Footprint, « mesurez l'empreinte socio-économique de votre activité ou de votre projet », 2015. .
- [200] O. COTE, « Approche intégrée et multicritères de la modélisation territoriale, éléments de cadrage pour la gestion des données territoriales », déc-2014.
- [201] C. Demazière, « L'action économique locale et l'environnement. Les collectivités locales prennent-elles en compte les contraintes et opportunités qu'offrent les ressources naturelles pour l'économie d'un territoire ? », *Développement durable et territoires. Économie, géographie, politique, droit, sociologie*, n° Dossier 1, sept. 2002.
- [202] Conseil Régional Rhone-alpes, « LES CAHIERS DE L' ÉCONOMIE DE PROXIMITÉ », avr. 2013.
- [203] GIS Alpes-Jura, Université de Grenoble, et Région Rhone-Alpes, « Ress Terr : valoriser les ressources territoriales : des clés pour l'action ».
- [204] H. Lamara, « Les deux piliers de la construction territoriale : coordination des acteurs et ressources territoriales », *Développement durable et territoires. Économie, géographie, politique, droit, sociologie*, juill. 2009.
- [205] V. Piveteau et S. Lardon, « Méthodologie de diagnostic pour le projet de territoire: une approche par les modèles spatiaux », *Géocarrefour: Revue de géographie de Lyon*, vol. 80, n° 2, p. 75-90, 2005.
- [206] MEEM et SOeS, « Service de l'Observation et des statistiques (SOeS) Commissariat général au développement durable ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.stats.environnement.developpement-durable.gouv.fr/Eider/series.do#>. [Consulté le: 02-déc-2016].
- [207] A. A. C. FRANC-COMTOIS, « Le transport des déchets », 2007.
- [208] Item, « Etude régionale de faisabilité de transport de déchets par voies fluviales et ferrées en Alsace : Etat des lieux flux de déchets », mars 2014.
- [209] « Publications - Comethe ». [En ligne]. Disponible sur: [http://www.comethe.org/index.php?option=com\\_content&view=article&id=84&Itemid=76](http://www.comethe.org/index.php?option=com_content&view=article&id=84&Itemid=76). [Consulté le: 14-nov-2016].
- [210] INSEE, « Emploi et chômage dans les nouvelles régions depuis la crise | Insee ». .

- [211] F. Pacheco-Torgal, « Introduction to the recycling of construction and demolition waste (CDW) », in *Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste*, Elsevier, 2013, p. 1-6.
- [212] CGEJET et CGEDD, « L'industrie du recyclage en France : changer de dimension pour créer des emplois », 2013.
- [213] EDF, « Etude de marché Ecologie industrielle et territoriale et proposition de business model », 2016.
- [214] JORF, *Code de l'environnement - Article L512-5*, vol. L512-5. 2012.
- [215] EDF, « Guide méthodologique sur l'utilisation des indicateurs ACV », 2010.
- [216] INRS, « Exposition à l'amiante lors du traitement des déchets : Guide de prévention », 2013.
- [217] INRS, « Amiante, Les produits, les fournisseurs », INRS, nov. 2014.
- [218] ANDEVA, « Amiante et Economie : Importations, coûts (France) ». 21-janv-2011.
- [219] RECORD, « Gestion de la fin de vie des matériaux fibreux », 2015.
- [220] ADEME, « DÉCHETS AMIANTÉS », sept. 2017.
- [221] JORF, *Arrêté du 15 février 2016 relatif aux installations de stockage de déchets non dangereux* / Legifrance. 2016.
- [222] HAS, « Exposition environnementale à l'amiante : état des données et conduite à tenir », mars 2009.
- [223] J.-M. Balet, *Gestion des déchets*. Paris: "L'Usine nouvelle : Dunod, 2014.
- [224] JORF, *Décret n°96-1133 du 24 décembre 1996 relatif à l'interdiction de l'amiante, pris en application du code du travail et du code de la consommation*. 1996.
- [225] JOUE, *Directive Européenne n°99-77 du 26 juillet 1999 199977 CE DE LA COMMISSION PORTANT SIXIEME ADAPTATION AU PROGRES TECHNIQUE (AMIANTE) DE L'ANNEXE I DE LA DIRECTIVE 76769 CEE DU CONSEIL CONCERNANT LE RAPPROCHEMENT DES DISPOSITIONS LEGISLATIVES, REGLEMENTAIRES ET ADMINISTRATIVES DES ETATS MEMBRES RELATIVES A LA LIMITATION DE LA MISE SUR LE MARCHE ET DE L'EMPLOI DE CERTAINES SUBSTANCES ET PREPARATIONS DANGEREUSES*. 1999.
- [226] INRS, « Amiante - Fiche toxicologique », 2009.
- [227] JORF, *Décret n°88-466 du 28 avril 1988 relatif aux produits contenant de l'amiante*. 1988.
- [228] JORF, *Décret n°2002-540 du 18 avril 2002 relatif à la classification des déchets*. 2002.
- [229] JORF, *Arrêté du 12 mars 2012 relatif au stockage des déchets d'amiante*. 2012.
- [230] INERTAM, « CR Visite de l'installation INERTAMdocx », 18-févr-2016.
- [231] UE, *Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council on waste and repealing certain Directives*, Brussels. 2008, p. 3–30.
- [232] JORF, *Code de l'environnement - Article R541-8*, vol. R541-8. .
- [233] ASTREE, « EMTA », 2017. .
- [234] VEOLIA, « Installation de Traitement et de Stockage de Déchets de Guitrancourt (78) », juin 2014.
- [235] EMTA GUITRANCOURT, « RAPPORT ANNUEL D'ACTIVITES 2013 », mars 2014.
- [236] MEEM, « Inspection des Installations Classées », *Inspection des installations classées*. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.installationsclassées.developpement-durable.gouv.fr/rechercheICForm.php>. [Consulté le: 13-juin-2017].
- [237] ADEME, « Bilans GES », 2016. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.bilans-ges.ademe.fr/fr/accueil/contenu/index/page/m%C3%A9thodes+de+calcul/siGras/0>.
- [238] BIO INTELLIGENCE SERVICE, « Analyse de Cycle de Vie du traitement des déchets amiantés par torche plasma », 2011.
- [239] DRIRE, « Rapport de l'inspection des installations classée ». 26-sept-2007.
- [240] EDF, « Cahier des charges de collecte, transport et traitement par vitrification de l'amiante piur les sites du groupe EDF », 2012.
- [241] INERTAM, « FICHE TECHNIQUE COFALIT ». 2005.
- [242] N. Calvet *et al.*, « Matériau de stockage thermique par chaleur sensible pour centrales électro-solaires testé sous flux solaire concentré », in *Proceedings in Congres Francais de Thermique-2010, Le Touquet, France*, 2010.

- [243] ADEME, « Bilan national du recyclage 2005-2014 », mai 2017.
- [244] JORF, *Décret n° 2011-828 du 11 juillet 2011 portant diverses dispositions relatives à la prévention et à la gestion des déchets*. 2011.
- [245] C. A. Garcia et G. Hora, « State-of-the-art of waste wood supply chain in Germany and selected European countries », *Waste Management*, sept. 2017.
- [246] ADEME, « Evaluation du Gisement de déchets bois et son positionnement dans la filière bois, bois énergie », avr. 2015.
- [247] EDF, « Unité de production méditerranéenne, valorisation des bois d'essartement : filières bois énergie », 2015.
- [248] FCBA, « Optimisation of material recycling and energy recovery from waste and demolition wood in different value chains », Rapport final B00613, avr. 2014.
- [249] ICF Environnement et Provence Forêts SAS, « Étude de valorisation de la ressource issue des essartements dans le lit de la Durance », 2011.
- [250] RECORD, « Valorisation énergétique des déchets de biomasse d'origine végétale », 2010.
- [251] ADEME, « La valorisation des emballages en France », 2013.
- [252] ADEME, « Référentiel combustible bois énergie : les plaquettes forestières. Définition et exigences », 2008.
- [253] ADEME, « Référentiel combustible bois énergie : les produits en fin de vie. Définition et exigences », 2008.
- [254] ADEME, « Référentiel combustible bois énergie : les connexes des industries du bois. Définition et exigences », 2008.
- [255] JORF, *Arrêté du 24 avril 2016 relatif aux objectifs de développement des énergies renouvelables*. 2016.
- [256] ADEME, « Les technologies des installations des secteurs collectifs/tertiaire et industriel », 2016.
- [257] ADEME, « Evaluation technique, environnementale et économique des techniques disponibles de dépoussiérage pour les chaufferies bois de puissance installée comprise entre 0 et 4MW », 2007.
- [258] EDF, « Valorisation des déchets de bois et économie circulaire », Mémoire de Projet de Fin d'Études. Maxime PILLARD, 2017.
- [259] G. Fourvel, « Valorisation agronomique des sédiments fins de retenues hydroélectriques en construction d'anthrosols fertiles », AgroCampus Ouest, Anger, 2018.
- [260] EDF, « Dragage avec gestion à terre des sédiments du garage aval de l'écluse de Strasbourg », mars 2017.
- [261] Syndicat Français de l'Industrie Cimentière, « INFOCIMENTES 2017 ». 2017.
- [262] A. Faure, « Capacité d'un sédiment à se substituer à la fraction argileuse de la matière première de l'industrie des liants hydrauliques », Université de Limoges, Limoges, 2017.
- [263] UNICEM et SNBPE, « L'industrie française du béton prêt à l'emploi ». 15-janv-2018.
- [264] CCB, « Fonctionnement d'une centrale à béton », *CENTRALES À BÉTON*, 2018. [En ligne]. Disponible sur: <http://ccb-cementir.be/centrales-a-beton/>.
- [265] Fédération Française des Tuiles et des Briques, « Les fabricants tuiles et briques », *Fédération Française des Tuiles et des Briques*, 2018. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.fft.org/les-fabricants/>.
- [266] AFNOR, « NF U 44-551 : Support de culture : dénomination, spécification, marquage. », mai 2002.
- [267] AFNOR, « NF U 44-051 : Amendements organiques - Dénominations spécifications et marquage. », avr. 2006.
- [268] AFNOR, « NF U 44-001 : Amendements minéraux basiques - Dénominations et spécifications », mars 2011.
- [269] JORF, *Arrêté du 08/01/98 fixant les prescriptions techniques applicables aux épandages de boues sur les sols agricoles pris en application du décret n° 97-1133 du 08/12/97 relatif à l'épandage des boues issues du traitement des eaux usées*. 1998.
- [270] JORF, *Arrêté du 02/02/1998 relatif aux prélèvements et à la consommation d'eau ainsi qu'aux émissions de toute nature des ICPE soumises à autorisation*. 1998.
- [271] l'environnement Centre d'études et d'expertise sur les risques la mobilité et l'aménagement (France) et Direction technique Infrastructures de transport et matériaux, *Acceptabilité environnementale de matériaux alternatifs en technique routière: guide d'application : les matériaux de déconstruction issus du BTP*. Lyon; Bron: Cerema, 2016.

- [272] JORF, *Arrêté relatif aux exploitations de carrières et aux installations de premier traitement des matériaux de carrières*. 1994.
- [273] JORF, *Arrêté du 12 décembre 2014 relatif aux conditions d'admission des déchets inertes dans les installations relevant des rubriques 2515, 2516, 2517 et dans les installations de stockage de déchets inertes relevant de la rubrique 2760 de la nomenclature des installations classées*, vol. JORF n°0289. 2014.
- [274] C. Gandar-Gervais, « Externalités et intervention publique : l'exemple de l'industrie des carrières », *Idées économiques et sociales*, vol. 156, n° 2, p. 42, 2009.
- [275] AFNOR, « NF P18-545 : Granulats - Éléments de définition, conformité et codification », sept. 2011.
- [276] « Projet National RECYBETON », *Projet National RECYBETON*. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.pnrecybeton.fr/>.
- [277] IREX, « Recybeton, étude de faisabilité recyclage complet des détons », 2011.
- [278] CIMBÉTON, « Les granulats pour béton.pdf ». 2008.
- [279] A. A. Akle, « Visualisation d'information pour une décision informée en exploration d'espace de conception par shopping », p. 244, oct. 2015.
- [280] B. TAIBI, « L'analyse Multicritère comme outil d'aide à la décision: Application de la méthode PROMETHEE Etude de cas: l'entreprise SEROR », 2010.
- [281] C. A. Bana e Costa et J.-C. Vansnick, « A Theoretical Framework for Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique (MACBETH) », in *Multicriteria Analysis*, J. Clímaco, Éd. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1997, p. 15-24.

# ANNEXES

<b>ANNEXES DU CHAPITRE 2</b>	<b>223</b>
Annexe 2.1 : Les lignes directrices liées au Life Cycle Costing.....	223
Annexe 2.2 : Description des principales méthodes multicritères de l'école américaine .....	224
Annexe 2.3 : Description des principales méthodes multicritères de l'école française .....	227
Annexe 2.4 : Les caractéristiques des principales méthodes d'aide à la décision multictières .....	231
Annexe 2.5 : Matrice pour le choix d'une méthode multicritères.....	232
Annexe 2.6 : Les indicateurs environnementaux non classés et difficilement identifiables .....	233
<b>ANNEXES DU CHAPITRE 3</b>	<b>235</b>
Annexe 3.1 : Compte rendu de la réunion avec Sébastien Damart.....	235
Annexe 3.2 : Les experts .....	239
Annexe 3.3 : Les critères batis à partir d'une échelle de ratio .....	243
Annexe 3.4 : Les critères particuliers .....	246
Annexe 3.5 : Questionnaire de la dimension réglementaire .....	249
Annexe 3.6 : Questionnaire de la dimension économique.....	256
Annexe 3.7 : Questionnaire de la dimension territoriale.....	263
Annexe 3.8 : Questionnaire de la dimension technique .....	274
Annexe 3.9 : Questionnaire de la dimension environnementale.....	283
<b>ANNEXES DU CHAPITRE 4</b>	<b>291</b>
Annexe 4.1 : Résultats des pondérations sur la dimension réglementaire .....	291
Annexe 4.2 : L'intensité concurrentielle dans les travaux de la littérature .....	292
Annexe 4.3 : Détails des critères du thésaurus de Bercy pour le cas du B to B.....	293
Annexe 4.4 : Détails des critères du thésaurus de Bercy pour le cas du B to C.....	294
Annexe 4.5 : Résultats des pondérations sur la dimension économique.....	295
Annexe 4.6 : Résultats des pondérations sur la dimension technique.....	296
Annexe 4.7 : Indicateurs emploi .....	297
Annexe 4.8 : Résultats des pondérations sur la dimension territoriale .....	298
Annexe 4.9 : Résultats des pondérations sur la dimension environnementale.....	299
<b>ANNEXES DU CHAPITRE 5</b>	<b>301</b>
Annexe 5.1 : Détail réglementaire lié au transport de déchets amiantés.....	301
Annexe 5.2 : Liste des ISDD .....	303
Annexe 5.3 : Liste des ISDND d'après FranceEau (Extrait) .....	304
Annexe 5.4 : Liste des ISDND d'après SINOE (extrait) .....	305
<b>ANNEXES DU CHAPITRE 6</b>	<b>307</b>
Annexe 6.1 : La classification des déchets de bois .....	307
Annexe 6.2 : Les étapes clés dans la fabrication d'un panneau de particule .....	308
Annexe 6.3 : Étapes de préparation des « déchets » de bois d'essartement .....	309
Annexe 6.4 : Annexe liée aux déchets de bois flottant .....	310
Annexe 6.5 : Prix de revente des palettes bois et prix de revente du broyat de palettes bois .....	311
Annexe 6.6 : Prix de revente des plaquettes forestières et prix de revente aux chaufferies .....	312
Annexe 6.7 : Annexe liée aux sédiments .....	313
Annexe 6.8 : Annexe liée aux installations de traitements des granulats.....	315
Annexe 6.9 : Annexe liée aux installations de réaménagement de carrières classiques .....	318
Annexe 6.10 : Annexe liée aux installations de réaménagement de carrières de gypse.....	318
Annexe 6.11 : Annexe liée aux installations de réaménagement de carrières ISDI+.....	318
Annexe 6.12 : Annexe liée aux installations de réaménagement de carrières ISDI.....	318
Annexe 6.13 : Annexe liée aux granulats de la déconstruction .....	319



## ANNEXES DU CHAPITRE 2

### Annexe 2.1 : Les lignes directrices liées au Life Cycle Costing.

L'état de la méthodologie du LCC conventionnel a peu évolué depuis son origine : le principe d'identification et d'actualisation des coûts est fondamentalement le même. Un certain nombre de lignes directrices et références de l'industrie ont été développées :

<b>GENERIQUES</b>
IEC 60300-3 — 3:2017. Dependability management - Part 3-3 : Application guide - Life cycle costing.
AS/NZS 4536:1999 (R2014). Life cycle costing - An application guide.
NEK EN 60 300-3 — 3:2004. Dependability management -- Part 3-3 : Application guide — Life cycle costing.
CSA Q635-95 (R2001). Guide to Life Cycle Costing.
SAE ARP-4293 : Life cycle cost - Techniques and applications.
<b>BATIMENT</b>
BS EN 16627:2015. Sustainability of construction works. Assessment of economic performance of buildings. Calculation methods
BS 8544:2013. Guide for life cycle costing of maintenance during the in-use phases of buildings.
BS EN 15 643 — 4:2012. Sustainability of construction works. Assessment of buildings. Framework for the assessment of economic performance
ISO 15686 — 5:2008. Buildings and constructed assets — Service-life planning — Life-cycle costing.
BS PD 156865:2008. Standardized method of life cycle costing for construction procurement. A supplement to BS ISO 15686-5. Buildings and constructed assets. Service life planning. Life cycle costing.
<b>INDUSTRIES DU PETROLE BRUT ET DU GAZ NATUREL</b>
ISO 15663 — 1:2006. Petroleum and natural gas industries Life cycle costing – Methodology.
<b>BIENS D'EQUIPEMENT</b>
NORSOK O-CR-001: Life cycle cost for systems and equipment
<b>USINES ET CHAINES DE PRODUCTION</b>
NORSOK O-CR-002: Life cycle cost for production facility.



## Annexe 2.2 : Description des principales méthodes multicritères de l'école américaine

Ces méthodes proposent une synthèse globale des performances sous la forme d'une note d'utilité globale (agrégation totale). Ainsi, les différents critères formant le système d'évaluation pour l'aide à la décision sont réduits en un seul critère quantitatif. C'est la façon d'effectuer cette agrégation qui différencie les méthodes de cette classe. Les parties suivantes présentent les principales méthodes discutées dans la littérature à savoir AHP, Evamix, TOPSIS.

### AHP

La méthode Analytic Hierarchy Process (AHP) propose d'organiser un problème décisionnel sous la forme d'une structure hiérarchique<sup>[120], [129] – [131]</sup>. Cette hiérarchisation permet d'organiser les critères selon leurs spécificités (environnements, économiques, etc..) et de mettre en évidence ceux qui ont un impact important dans la décision finale (les critères avec un poids fort). Cette méthode est utilisée dans de nombreux domaines tels que les choix gouvernementaux<sup>[132]</sup>, l'industrie<sup>[133]</sup>, le sport<sup>[131]</sup>, le développement durable<sup>[134]</sup>, l'optimisation de la fiabilité (classement des risques)<sup>[122]</sup>, l'agronomie<sup>[135]</sup>, ou encore la gestion des déchets<sup>[40], [120], [136], [137]</sup>. Cette méthode propose d'aider un décideur à réduire un problème complexe en une série de comparaison deux à deux (comparaison par paire). Le tableau ci-dessous illustre la comparaison de 2 critères.

CRITERE	ÉCHELLE SEMANTIQUE									CRITERE
Le respect de la hiérarchie de la gestion des déchets	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Respect du principe de proximité

Pour faciliter les séries de comparaison, les préférences sont couramment données sous la forme d'une matrice de comparaison :

	CRITERE 1	CRITERE 2	CRITERE 3	CRITERE 4
Critère 1	<b>1,00</b>	A	B	C
Critère 2	1/A	<b>1,00</b>	D	E
Critère 3	1/B	1/D	<b>1,00</b>	F
Critère 4	1/C	1/E	1/F	<b>1,00</b>

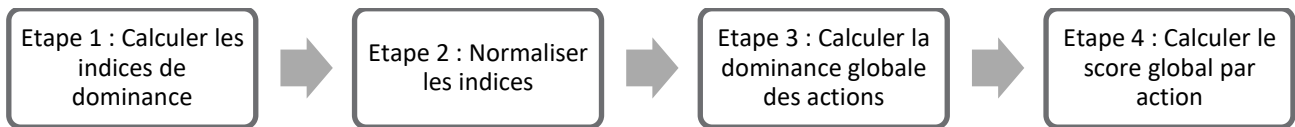
La matrice de comparaison, réalisée à partir du jugement d'experts, génère une importance relative (un poids) pour chacun des critères. L'expert est aidé dans son jugement par une échelle sémantique, également appelée échelle verbale.

ÉCHELLE VERBALE	ÉCHELLE NUMERIQUE	COMMENTAIRES
Les deux éléments sont égaux	1	Deux éléments contribuent autant à la propriété
L'élément domine modérément l'autre	3	L'expérience et l'appréciation personnelles favorisent légèrement un élément par rapport à un autre
L'élément domine l'autre	5	L'expérience et l'appréciation personnelles favorisent fortement un élément par rapport à un autre
L'élément domine très fortement l'autre	7	Un élément est fortement favorisé et sa dominance est attestée dans la pratique
L'élément est absolument dominant	9	Les preuves favorisant un élément par rapport à un autre sont aussi convaincantes que possible
Les valeurs intermédiaires (2, 4, 6, 8) peuvent être utilisées pour affiner le jugement		

Il s'agit ensuite de synthétiser les résultats où, plus le score est élevé, meilleure est la performance de l'alternative par rapport aux critères considérés. Il s'agit ensuite de déterminer un score global pour chaque option (alternative) afin de fournir le classement des différentes solutions étudiées.

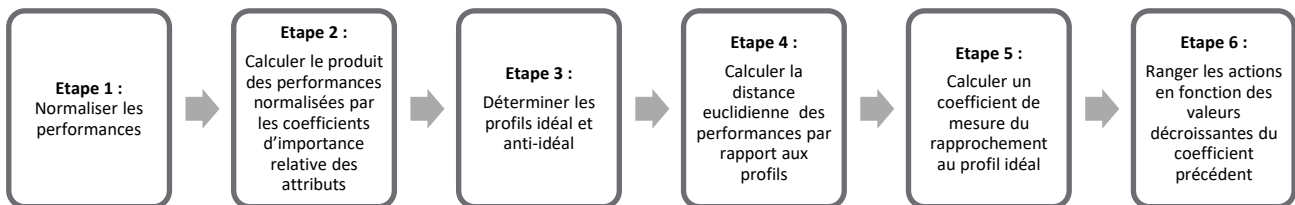
EVALUATION of MIXed Criteria (EVAMIX)

La méthode EVAMIX, développée par Voogd en 1983, permet de traiter des évaluations ordinales (qualitatives) et cardinales (quantitatives). Elle est composée de quatre étapes principales. Pour évaluer une action par rapport à une autre, on calcule les deux indices de dominance qui servent aux évaluations ordinales et cardinales. Ces deux indices sont par la suite normalisés (étape 2) puis combinés pour donner une mesure globale de la dominance (étape 3). Il s'agit de la somme pondérée des indices de dominance normalisés. Enfin, un score global par action est calculé, ce qui permet de classer les actions (étape 4).



Technique for Order Preference by Similary to Ideal Solution (TOPSIS)

Cette méthode, créée par *Hwang et Yoon* en 1981<sup>[121], [122]</sup>, propose de sélectionner une solution en fonction des distances euclidiennes avec la solution idéale et la pire des solutions. La solution idéale est définie comme celle qui répond au mieux sur chacun des critères et inversement pour la pire. En outre, cette méthodologie permet donc d'ordonner les solutions par rapport à une notion d'idéal et anti-idéal. La méthode est composée des six étapes ci-dessous :



Pour normaliser les préférences (étape 1), l'ensemble des informations est résumé dans une matrice de performance. Celle-ci résume l'ensemble des informations avec en colonne les données et en ligne les différentes solutions comparées

	CRITERE 1	CRITERE 2	CRITERE 3
Installation A	30	0,1	2500
Installation B	60	0,5	3500
Installation C	90	0,4	5000

Cette dernière est ensuite normalisée par colonne selon la démarche décrite au ci-dessous (étape 2).

MATRICE DE PERFORMANCE	NORMALISATION	MATRICE NORMALISEE
$\begin{bmatrix} 30 & 0,1 & 2500 \\ 60 & 0,5 & 3500 \\ 90 & 0,4 & 5000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 30/(\sqrt{30^2 + 60^2 + 90^2}) & \dots & 2500/(\sqrt{2500^2 + 3500^2 + 5000^2}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 90/(\sqrt{30^2 + 60^2 + 90^2}) & \dots & 500/(\sqrt{2500^2 + 3500^2 + 5000^2}) \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,27 & \dots & 0,38 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0,80 & \dots & 0,76 \end{bmatrix}$

Il s'agit ensuite de calculer l'importance des éléments de la matrice normalisée via une somme pondérée entre les performances de la matrice normalisée et le poids des critères (à définir à partir d'une autre méthode comme

AHP ou SMART). Ces poids doivent être compris entre 0 et 1 et de manière à ce que la somme des poids soit égale à 1.

MATRICE NORMALISEE		POIDS CRITERE 1 : 0,45 ; CRITERE 2 : 0,35 ; CRITERE 3 : 0,2		L'IMPORTANCE DES ELEMENTS
$\begin{bmatrix} 0,27 & 0,17 & 0,38 \\ 0,53 & 0,84 & 0,53 \\ 0,80 & 0,50 & 0,76 \end{bmatrix}$	=	$\begin{bmatrix} 0,27 * 0,45 & \dots & 0,38 * 0,2 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0,80 * 0,45 & \dots & 0,76 * 0,2 \end{bmatrix}$	=	$\begin{bmatrix} 0,12 & 0,06 & 0,08 \\ 0,24 & 0,30 & 0,11 \\ 0,36 & 0,18 & 0,15 \end{bmatrix}$

Il convient ensuite d'identifier le profil idéal et anti-idéal. Le premier profil contient les meilleures valeurs de chaque colonne de la matrice d'importance et le profil anti idéal les pires

PROFIL IDEAL	PROFIL ANTI-IDEAL
[0,36 0,30 0,15]	[0,12 0,06 0,08]
Les meilleures valeurs de chaque colonne	Les pires valeurs de chaque colonne

À ce stade (étape 4), il faut calculer les distances euclidiennes entre l'importance des éléments et les profils idéal et anti-idéal de la manière suivante

SOLUTION 1	...	SOLUTION 3
$\sqrt{(0,12 - 0,36)^2 + (0,06 - 0,30)^2 + (0,08 - 0,15)^2} = 0,35$	...	$\sqrt{(0,36 - 0,36)^2 + (0,18 - 0,30)^2 + (0,15 - 0,15)^2} = 0,12$

Le coefficient de mesure de distance de rapprochement (étape 5) s'obtient de la manière suivante

SOLUTION 1	SOLUTION 2	SOLUTION 3
$\frac{0,12}{(0,35 + 0,12)} = 0,26$	$\frac{0,06}{(0,13 + 0,06)} = 0,32$	$\frac{0,08}{(0,12 + 0,08)} = 0,39$

Avec la méthode TOPSIS, on obtient les coefficients suivant : 0,39 > 0,32 > 0,26 (étape 6) et la solution 3 semble la plus adaptée.

### Annexe 2.3 : Description des principales méthodes multicritères de l'école française

La seconde classe de méthodes multicritères d'aide à la décision correspond à la méthodologie d'agrégation partielle. Celle-ci consiste à établir une relation de préférence entre les actions considérées. Pour cela, il s'agit de considérer d'une part, les arguments en faveur d'une solution plutôt qu'une autre et d'autre part, les raisons essentielles qui contredisent fortement cette proposition. Ainsi, la problématique à laquelle répondent les méthodes d'agrégation partielle est la suivante :

*Comment établir une relation de « surclassement » (de préférence) entre les solutions (actions, alternatives) ?*

Il existe deux grandes familles de méthodes de « surclassement » :

- La famille ELECTRE (pour ELimination Et Choix Traduisant la REalité), fondée par *Bernard Roy*.
- La famille PROMETHEE (pour Preference Ranking Organization METHod for Enrichment of Evaluations), fondée par *P. Brans, J.P. Vincke et B. Mareschal*.

Les deux familles suivent des principes proches, à notre échelle de description, où les différences découlent principalement dans la manière de formaliser et d'exploiter la définition du « surclassement ».

Nous présentons également la méthode MACBETCH. Celle-ci nous semble intéressante de par son fonctionnement itératif.

#### La famille Electre

Les méthodes ELECTRE sont les méthodes de surclassement les plus importantes et les plus utilisées dans la littérature de l'école française. La famille Electre comporte plusieurs méthodes qui répondent aux différentes problématiques de décisions. Ainsi, ELECTRE I et Electre 1S répondent à la problématique du choix alors que les méthodes ELECTRE II, ELECTRE III et ELECTRE IV répondent à la problématique de rangement. En dernier lieu, les méthodes ELECTRE TRI-B et ELECTRE TRIC résolvent des problèmes de classification.

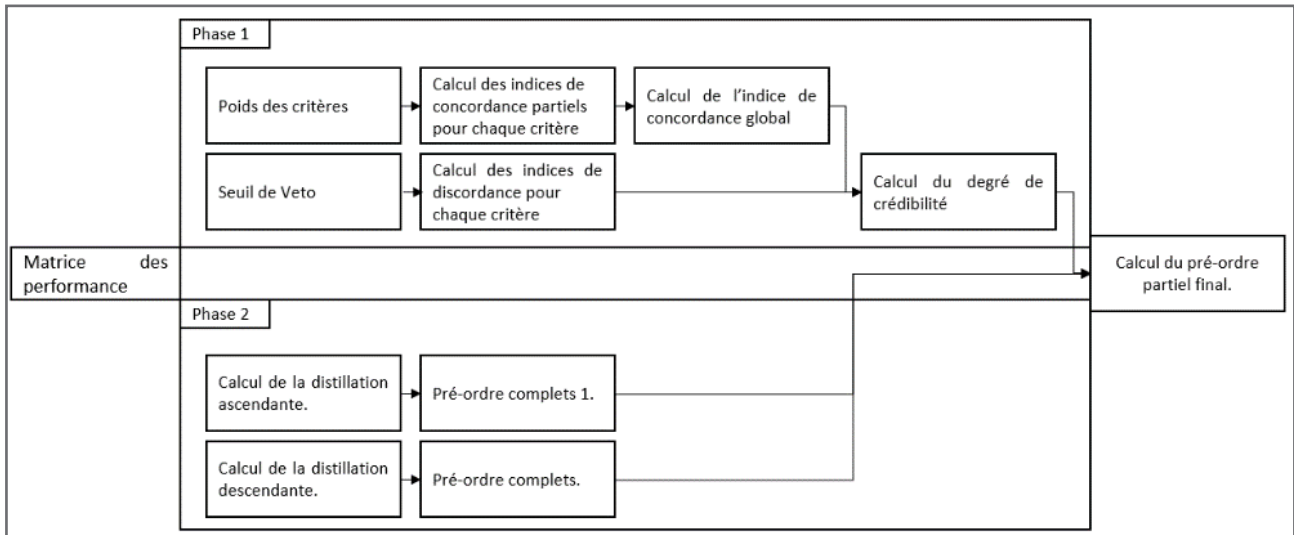
Aujourd'hui, il est démontré que la méthode la plus utilisée de cette famille est Electre III<sub>[41]</sub>. Nous proposons de détailler brièvement le fonctionnement de cette méthode.

#### **Electre III :**

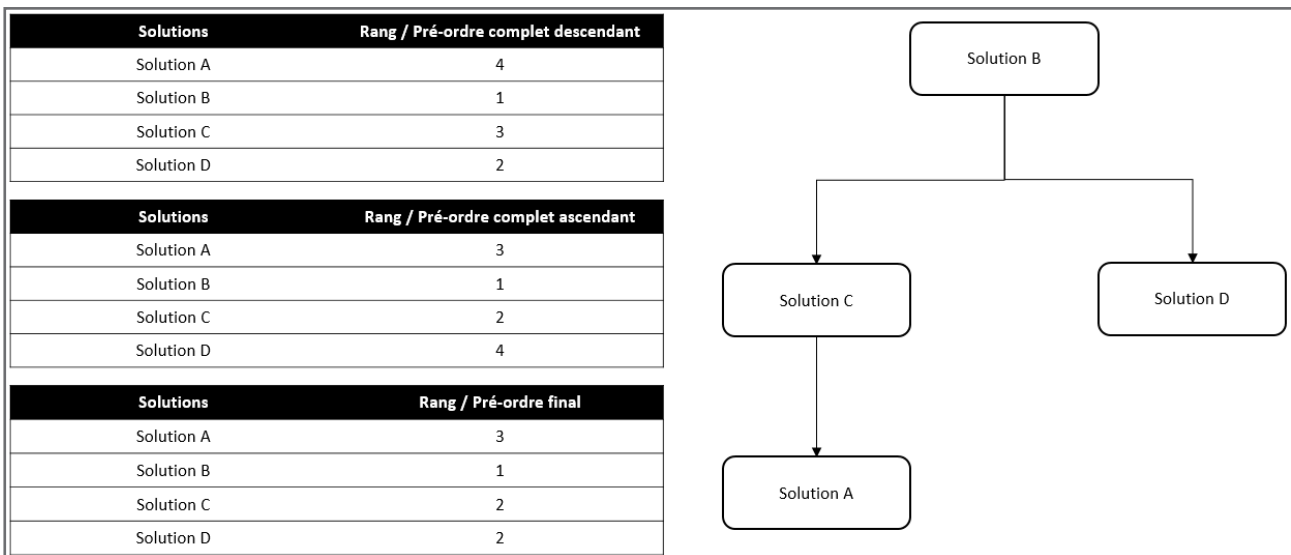
La méthode d'analyse multicritères ELECTRE III a été développée en 1978. Elle est fondée sur la construction d'un classement d'alternatives, par le biais d'une approche d'agrégation partielle des performances.

ELECTRE III permet de prendre en compte les poids donnés aux critères de jugement. Cette étape de pondération permet aux différents acteurs de donner leurs opinions et d'exprimer d'éventuelles différences de jugement. ELECTRE III relève de la problématique de classement. Ainsi, les utilisateurs de la méthode ont pour objectif de classer les alternatives, de la « meilleure » à la « moins bonne ».

Cette méthode, comme les autres méthodes Electre, est composée de deux phases principales. La première consiste à construire la relation de surclassement et la seconde à exploiter cette relation. Lors de la première phase, il s'agit de définir le poids des critères, les seuils d'indifférence et de préférence et les seuils de véto.



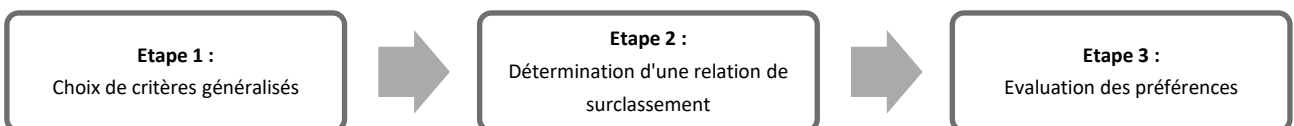
La deuxième phase consiste en l'exploitation des indices de surclassement par paire à travers les distillations ascendante et descendante pour arriver à deux préordres. Enfin, l'analyse des deux préordres introduit la notion d'incomparabilité, c'est-à-dire que deux solutions peuvent ne pas pouvoir être comparées (solution C et D de la figure ci-dessous) et donne le surclassement final.



Dans cet exemple, la solution B est surclassée par toutes les solutions (C, D et A). Les solutions C et D surclassent toutes les deux la solution B. Les solutions C et D sont incomparables. Enfin, la solution A surclasse les solutions B et C.

**PROMETHEE**

La méthode PROMETHEE a été proposée pour la première fois en 1982 par Jean-Pierre Brans de l'université de Bruxelles<sup>[280]</sup>. Elle propose de ranger les actions en un préordre partiel qui peut parfois mener à l'incomparabilité. La mise en œuvre de la méthode est ramenée à trois principales étapes.



La première étape consiste à associer un critère généralisé afin d'enlever les échelles. Il s'agit de transformer le critère en une fonction de préférence. Celle-ci traduit l'intensité de préférence d'une action sur une autre :

- Indifférence,
- Préférence faible,
- Préférence forte,
- Préférence stricte.

Pour faciliter la tâche au décideur, PROMETHEE prend en compte six types de critères :

TYPE DE CRITERE	REPRESENTATION GRAPHIQUE
CRITERE USUEL	<p>Préférence de A par rapport à B   Préférence de B par rapport à A</p>
QUASI CRITERE	<p>Préférence de A par rapport à B   Zone d'indifférence   Préférence de B par rapport à A</p>
CRITERE A PREFERENCE LINEAIRE	<p>Préférence de A par rapport à B   Préférence de B par rapport à A</p>
PSEUDO CRITERE	<p>Préférence de A par rapport à B   Zone d'indifférence   Préférence de B par rapport à A</p>
CRITERE A PREFERENCE LINEAIRE AVEC ZONE D'INDIFFERENCE	<p>Préférence de A par rapport à B   Zone d'indifférence   Préférence de B par rapport à A</p>
CRITERE GAUSSIEN	<p>Préférence de A par rapport à B   Préférence de B par rapport à A</p>

La deuxième étape permet de déterminer une relation de surclassement par le biais d'un indice de préférence (par exemple : l'écart maximum entre deux actions) qui quantifiera les préférences du décideur.

Il s'agit ensuite de faire la moyenne pondérée (ou arithmétique dans le cas où tous les poids sont égaux) de l'ensemble des intensités des fonctions de préférence afin d'obtenir une performance globale d'une alternative A par rapport à une alternative B.

Enfin, il s'agit pour la dernière étape d'établir l'évaluation de la préférence du décideur via la prise en compte des flux entrants et sortants. Le premier flux permet de visualiser le caractère surclassé d'une alternative A face à une alternative B, alors que le second flux permet de visualiser le caractère surclassant d'une alternative A par rapport à une alternative B. L'exploitation des deux flux permet d'exprimer le flux net, c'est-à-dire le bilan des flux entrants et sortants d'une alternative. Plus l'indice de sur classement est élevé, plus l'alternative

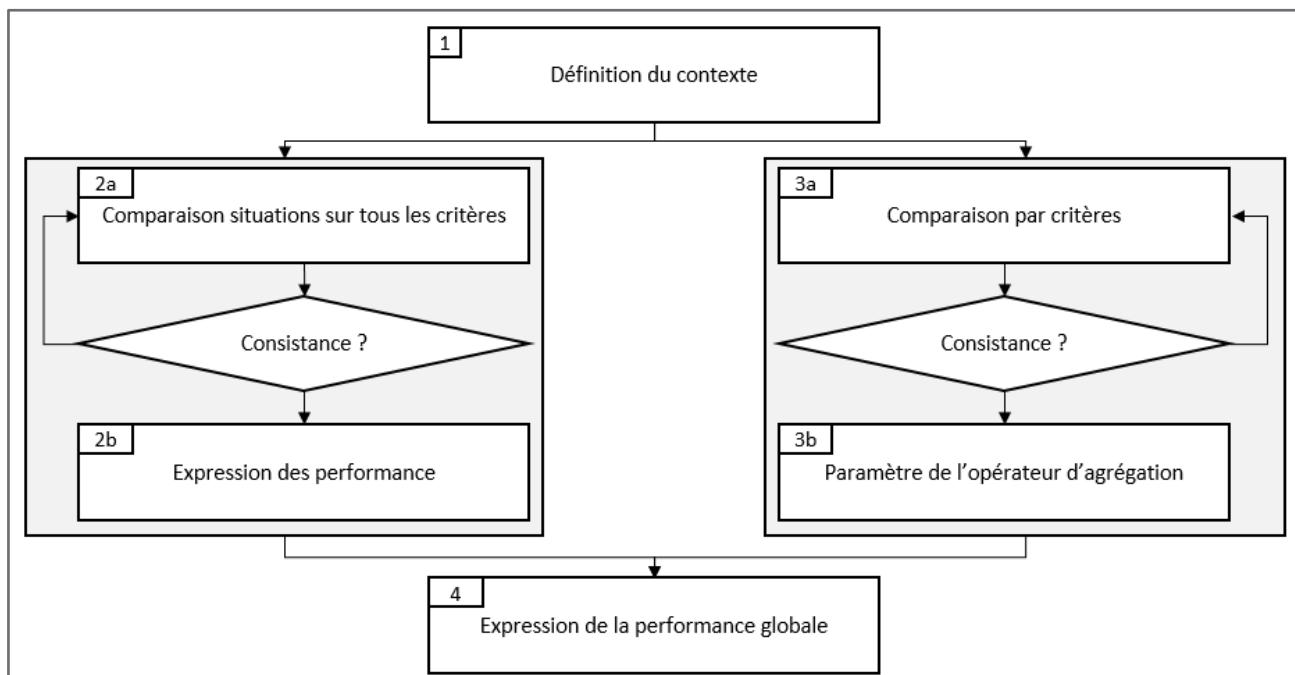
est meilleure comparée aux autres solutions. L'opération est à effectuer pour chaque alternative afin d'obtenir une relation de surclassement complète.

### MACBETH

La méthode Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation TecHnique, dite MACBETH est une méthode assez récente (1994) et inventée par C.A. Bana E Costa, J.C. Vansnick et J. M. De Corte<sup>[281]</sup>.

Cette méthode propose de comparer les solutions en fonction de leur attrait pour le décideur. Elle est conçue pour utiliser uniquement des critères qualitatifs mais des critères quantitatifs peuvent également être introduits. De plus, les critères peuvent être pondérés. L'originalité de cette méthode repose sur son approche itérative. En effet, le décideur est accompagné tout au long de son processus de décision (structuration, évaluation discussion, recommandation) et peut modifier les valeurs proposées par l'outil.

La méthode repose sur quatre grandes étapes où les étapes [2] et [3] sont réalisées en parallèle.



La première étape [1] consiste à définir le contexte et à préciser les critères et les solutions envisagées. Il s'agit ensuite de construire en parallèle les vecteurs d'expressions élémentaires (étape [2 b]) et les paramètres de l'opérateur d'agrégation (étape [3 b]). L'utilisateur, de la méthode, est invité à fournir un jugement ordinal sur l'attractivité d'une alternative par rapport à une autre pour chacun des critères : *Est-ce que a est plus attractif que b ? (oui/non)*.

Ensuite, s'il juge que les deux solutions n'ont pas une attractivité égale (*réponse oui*), il est alors sollicité pour définir la différence d'attractivité entre les deux alternatives :

« Si oui, quelle est la différence d'attractivité ? »

Pour répondre à cette question, les auteurs de MACBETH proposent de nuancer la réponse sur six niveaux de (1) très faible, (2) faible, (3) modérée, (4) forte, (5) très forte à (6) extrême. Enfin, la méthode façonne les expressions de performance lors de la réalisation de l'étape [4]



## Annexe 2.4 : Les caractéristiques des principales méthodes d'aide à la décision multicritères

NOM DE LA METHODE	CARACTERISTIQUES PRINCIPALES
AHP	Structure hiérarchique <sup>[121], [122]</sup> Evolutive <sup>[123]</sup> Échelle sémantique pour exprimer les préférences <sup>[121], [122]</sup> Transparente Facile d'utilisation <sup>[123]</sup> Un grand nombre d'éléments entraîne une augmentation du nombre de comparaison à effectuer <sup>[121], [122], [124]</sup> Attention à l'interdépendance des critères et des solutions comparées <sup>[121], [123]</sup> La démarche est transparente et claire. Elle permet d'éviter les incohérences et les polémiques lors de la définition des poids <sup>[125]</sup> Prend en compte des critères qualitatifs et quantitatifs <sup>[118]</sup>
MACBTEH	Les échelles de la méthode MACBETH ne sont pas bornées <sup>[122]</sup>
PROMETHEE 1	Construit une relation de surclassement traduisant une intensité de préférence <sup>[122]</sup> Incomparabilité <sup>[280]</sup> Prend en compte des critères quantitatifs <sup>[118]</sup> Facile et compréhensible par l'utilisateur <sup>[121]</sup>
PROMETHEE 2	La méthode construit un préordre total excluant l'in-comparabilité et réduisant fortement l'indifférence <sup>[122]</sup> Facile et compréhensible par l'utilisateur <sup>[121]</sup>
PROMETHEE 3	Mise en place du seuil d'indifférence <sup>[122]</sup> Difficile à mettre en place <sup>[122]</sup>
PROMETHEE 4	Facile et compréhensible par l'utilisateur <sup>[121]</sup> La méthode nécessite le calcul d'intégrale plutôt que des sommes <sup>[122]</sup>
ELECTRE 1	Elle permet de s'intéresser uniquement aux meilleures actions <sup>[121], [122]</sup> Le choix des seuils est arbitraire <sup>[125]</sup> Le résultat final n'est pas toujours concluant et décisif <sup>[125]</sup>
ELECTRE 2	Dans certains cas, il s'avère difficile de déterminer le préordre partiel <sup>[121]</sup> Les évaluations doivent être cardinales <sup>[121], [122]</sup> Electre II est une méthode partiellement compensatoire <sup>[121]</sup>
ELECTRE 3	La méthode Electre III est beaucoup plus sophistiquée que Electre II : elle exige un grand nombre de paramètres techniques <sup>[121]</sup> Electre III a été jugée trop complexe et parfois difficile à interpréter <sup>[121], [122]</sup>
ELECTRE 4	La méthode Electre IV est facile à exploiter, toutefois, elle exige un grand nombre de paramètres techniques <sup>[121], [122]</sup>
ELECTRE Is	Elle permet de s'intéresser uniquement aux meilleures actions <sup>[121], [122]</sup>
ELECTRE Tri — B	Elle exige un grand nombre de paramètres techniques <sup>[122]</sup>
ELECTRE Tri — C	Elle exige un grand nombre de paramètres techniques <sup>[122]</sup>
TOPSIS	Facile à appliquer <sup>[121]-[123]</sup> Les attributs doivent être de nature cardinale <sup>[121]</sup> La méthode TOPSIS est partiellement compensatoire <sup>[121]</sup>
SMART	Facile à exploiter <sup>[121]-[123]</sup> Les attributs doivent être de nature cardinale <sup>[121]</sup> La méthode SMART utilise la forme additive, elle est ainsi compensatoire <sup>[121]</sup>
MAVT	Exigeante de point de vue informationnel <sup>[121], [122]</sup> Difficile à mettre en place <sup>[121], [122]</sup> Les échelles doivent être de nature cardinale <sup>[121]</sup> La méthode MAVT est partiellement compensatoire <sup>[121]</sup>
MAUT	Exigeante de point de vue informationnel <sup>[121] — [123]</sup> Difficile à mettre en place <sup>[121], [122]</sup> Les échelles doivent être de nature cardinale <sup>[121]</sup> La méthode MAVT est partiellement compensatoire <sup>[121]</sup> Prend en compte l'incertitude <sup>[123][123]</sup>
UTA	La méthode UTA exige des données cardinales <sup>[121], [122]</sup> La méthode UTA est compensatoire <sup>[121]</sup> La méthode UTA exige l'indépendance au sens des préférences <sup>[122]</sup>
EVAMIX	Facile à mettre en œuvre <sup>[121], [122]</sup> Elle permet de traiter les évaluations ordinales et cardinales <sup>[121], [122]</sup> EVAMIX est une méthode partiellement compensatoire <sup>[121], [122]</sup>

**Annexe 2.5 : Matrice pour le choix d'une méthode multicritères**

INPUT	OUTPUT						
	O1	O2	O3	O4	O5	O6	O7
I1			Borda Condorcet		Conjonctive Disjonctive		
I2							
I3				Electre IV			
I4					MaxiMin		
I5							
I6							
I7							
I8							
I9							
I10		Lex. semiord.		ORESTE			
I11							
I12				MELCHIOR			
I13							
I14							
I15							
I16			NAIADE II	NAIADE I			
I17			REGIME QUALIFEX	Electre III	MACBETH	Electre I	
I18			Promethee 2	Promethee 1			Electre TRI
I19			Evamix	Electre III		Electre IS	
I20	Somme pondérée MAUT TOPSIS		MAVT SMART UTA				ELECTRE IS
I21	AHP				MaxiMin flou		
I22							
I23							
I24			PAMSSEM II	PAMSSEM I			

I : données en entrée

O : données en sortie

**Annexe 2.6 : Les indicateurs environnementaux non classés et difficilement identifiables**

NOM DES CRITERES ET DES INDICATEURS
Total amount of SO2 emission
Water Pollution
Air and Water Pollution
Exposure to Pathogens
Releases to the air and water with health effects
Environmental hygiene
Ecological impact
Hygiene/health and safety risks
Other health risks
impacts on the environment
Gaseous emissions
Heavy metals
Salts
Residues characteristics
Odours
Bruit
Visual impact
Acceptance
Non radiological health effects
Short-term radiological safety
Long-term radiological safety



## ANNEXES DU CHAPITRE 3

### Annexe 3.1 : Compte rendu de la réunion avec Sébastien Damart.



Sébastien  
Damart.pptx

Sébastien DAMART, est Professeur des Universités. Il travaille depuis plusieurs années sur les démarches de management intégratives et participatives. Dans ce cadre, il a autant été amené à concevoir les outils pour la structuration de ces démarches qu'à travailler sur les philosophies de management sous-jacentes, celles développées par Mary Parker Follett, pionnière du management, en particulier. Ses travaux l'ont conduit à collaborer avec des organisations de différents contextes, dont celui des établissements de santé. Plus récemment, il initie l'Observatoire de l'Innovation Managériale ([www.observatoire-management.org](http://www.observatoire-management.org)) du Cercle de l'Innovation de l'Université Paris-Dauphine.

#### Résumé :

Ce compte rendu retranscrit les principaux échanges intervenus lors de la réunion avec le professeur Sébastien DAMART. Cette réunion avait pour objectif de recueillir son avis sur la construction de nos critères et des adaptations que nous avons fait de la méthodologie AHP. À ce titre, monsieur DAMART est considéré comme un expert de confrontation. Il se doit alors d'être critique à la fois pour les choix méthodologiques quant à l'utilisation de la méthode AHP, mais aussi par rapport de la construction générale de notre modèle.

#### Présentation de la thèse :

EDF travaille à l'élaboration d'un outil polyvalent comparant, via des critères et l'avis d'experts, des installations de gestion de déchets sur ces 5 dimensions : technique, économique, environnementale, territoriale et réglementaire. Pour construire et pondérer les critères entre eux, nous avons choisi d'utiliser et d'adapter une méthodologie qui permet, via l'avis d'experts, l'agrégation de critères qualitatifs et quantitatifs nécessaires pour effectuer la comparaison des installations.

#### Objectif de la réunion :

Dans le cadre de la thèse, nous avons choisi d'utiliser la méthodologie AHP. Cette méthode multicritères permet d'obtenir les poids relatifs des critères de chaque dimension. La littérature montre que cette méthode est largement appliquée pour choisir un site de construction d'une unité de traitement des déchets, ou pour choisir une voie d'orientation d'un flux de déchet particulier. Cependant, son utilisation se limite à des cas précis de comparaison, où les installations sont distinguées directement entre elles sur plusieurs critères.

Notre travail consiste à aider les gestionnaires de déchets dans leur choix d'orientation vers une filière. En conséquence, nous avons besoin d'un outil permettant de s'adapter à la situation du gestionnaire c'est-à-dire de réaliser un outil polyvalent, indépendant vis-à-vis du déchet et de la situation géographique du gestionnaire de déchets. Pour cela, nous avons bâti un ensemble de critères où chacun d'eux est pondéré via cette méthodologie. Néanmoins, certains critères nécessitent une modification de la méthodologie d'obtention des poids. Nous avons fait des choix de construction qui doivent être confirmés par un expert ayant une connaissance approfondie des méthodes multicritères.

## Déroulement de la réunion :

La réunion qui s'est tenue dans les locaux de l'université Paris Dauphine a duré 1 h. L'échange a porté sur les points suivants :

### La méthodologie générale : recherche-action

- Nous bâtissons les critères sur le cas des déchets amiantés et nous affinons et validons la construction des critères sur 3 autres déchets étudiés.

### Les critères

- La typologie des critères et notamment ceux qui ont une échelle d'évaluation continue. Les hypothèses de construction sont-elles correctes ?
- Les notes des éléments composants les échelles d'évaluation

### Les experts

- Comment gérer les écarts importants de préférences des experts sollicités ?
- L'agrégation peut intervenir à 2 moments, en amont ou en aval de l'application de la méthode AHP. Quelle est la meilleure solution ? Quels sont les avantages et les limites des 2 solutions ?
- Pour les interviews, est-il préférable de recueillir les avis d'experts individuellement ou lors d'un échange commun ?

### Les résultats

- Lors de l'étude de cas, les résultats « globaux » par dimensions ne permettent pas aisément de trancher si une solution est meilleure que l'autre. Existe-il un seuil d'indifférence ?
- Nous faisons à présent des analyses de sensibilité sur les données, le positionnement des installations sur les échelles d'évaluations. Existe-il d'autres analyses de sensibilité ?

### Les limites de la méthodologie AHP

## La méthodologie générale :

Mr DAMART n'a pas fait de remarques particulières par rapport à cette démarche.

### Les critères :

Les critères peuvent prendre plusieurs valeurs, dépendantes des échelles d'évaluations. Ces échelles peuvent avoir plusieurs niveaux (de 2 à 10). Mr DAMART confirme qu'il est possible d'utiliser une partie d'une méthode d'agrégation (AHP ou Electre, sommes pondérée) pour obtenir les poids des éléments des échelles d'évaluation. En ce qui concerne les critères avec une échelle continue (échelle non bornée), Mr DAMART juge la construction pertinente. Il précise que nous avons 2 grandes constructions : des critères construits sur une échelle ordinale non numérique où les alternatives sont scorées indépendamment des unes des autres et les critères où les alternatives sont « directement » comparées par paires via un paramètre intermédiaire.

La méthodologie de construction et d'agrégation par dimension que nous avons choisie (somme des scores obtenus sur les critères) implique que l'on accepte la compensation des critères. Exemple : je peux compenser un mauvais niveau de responsabilité par un bon respect de la hiérarchie.

Mr DAMART préconise de demander aux experts leurs avis à ce sujet (cela engendre une charge d'interviews supplémentaire assez importante). Si l'expert confirme la compensation alors la somme est adaptée, sinon cela signifie qu'il faudrait utiliser une méthode type Electre pour cette partie plutôt qu'une somme. Mr DAMART précise qu'il est important de faire figurer cette hypothèse (forte) dans le protocole d'interrogation afin que l'expert en soit conscient.

Ensuite, pour continuer sur l'évaluation des alternatives sur les critères, nous avons échangé sur le fait que certaines alternatives ne sont pas évaluées par tous les critères. Saaty propose la structure hiérarchique incomplète. Dans notre cas cela ne pose pas de problème, car nous n'avons pas de somme pondéré « basique ». Si cette méthode avait été adoptée, nous aurions eu une « surpondération » des critères. Techniquement, la structure hiérarchique incomplète ne pose pas de problèmes pour les méthodes AHP, Electre, Macbeth, ou autre. En revanche « conceptuellement » Mr DAMART émet une critique sur cet aspect. Selon lui, il est préférable que la famille de critères puisse évaluer l'ensemble des alternatives. Pour appliquer son point de vue, il convient de modifier la construction des échelles de façon à ce que toutes les alternatives (principalement les filières d'élimination) puissent être évaluées sur chacun des critères. Cependant, je lui ai

précisé qu'il existe des cas de figure, une alternative « non favorisée », car non évaluée par tous les critères, peut être meilleure qu'une installation entièrement évaluée par tous les critères.

Enfin nous avons poursuivi la discussion sur les critères continus construits à partir d'un questionnaire par palier (exemple : le critère de la pérennité de l'installation, ou l'emploi). Mr DAMART nous recommande 2 possibilités :

- Soit d'augmenter le nombre de niveaux dans l'échelle. Cette méthode permettra à l'expert de déterminer le ou les seuil(s) de changement(s).
- Soit, d'établir une courbe de tendance exponentielle, logarithmique, polynomiale ou de puissance plutôt que linéaire. Cette solution nécessite une confirmation du résultat par l'expert.

Ces 2 propositions se basent sur le principe que l'expert est dans la capacité d'évaluer plus précisément les valeurs comprises dans les intervalles. Il propose 2 façons d'intégrer leurs avis :

- Interroger les experts les plus précis (ou ayant la capacité d'être plus précis) afin d'obtenir leurs avis selon un protocole plus fin. Par exemple pour le critère T1 — la pérennité de l'installation, les experts peuvent être capables de donner 2 seuils ; le premier est certainement bas et signifie, par exemple, que la technologie est fragile alors que le second, plus élevé, permet de déduire la durée à partir de laquelle il n'y a plus d'apprentissage.
- d'intégrer un seuil d'indifférence pour les autres. Cependant, il ignore la façon d'intégrer cette solution dans notre modèle.

De plus, il précise également que si un nombre limité d'experts se sent apte à participer à une évaluation plus fine, il est préférable de rester sur une construction par intervalle.

### Les experts

Il existe plusieurs possibilités pour agréger les avis d'experts avec la méthode utilisée :

- soit en amont de la méthode, c'est-à-dire que la donnée de préférence rentrée dans la matrice de comparaison est une moyenne du panel d'experts interrogé,
- soit en aval de la méthode (ce que nous avons fait jusqu'à présent).

Pour l'agrégation, Mr DAMART conseille d'utiliser la méthode Delphi. Cette dernière vise à obtenir un avis aussi consensuel que possible des experts grâce à un processus structuré de communication organisant la production, l'agrégation et la modification des opinions d'un groupe indépendant d'experts. Il n'y a alors plus qu'un avis.

Exemple : Si 95 % des experts disent A et que les 5 % des autres préfèrent B, la méthode Delphi propose à l'organisateur des interviews de demander aux experts non majoritaires (5 %) si ces derniers maintiennent leurs jugements.

Attention, si les avis d'experts sont très dispersés Delphi n'a plus d'intérêt, il est préférable de n'utiliser cette méthode que si les dispersions sont assez classiques (courbe de Gauss). Les experts seront alors contraints à se rallier au point de vue des autres experts et à converger vers une préférence commune. Si la dispersion est trop grande, il est difficile de justifier cette méthode.

Mr DAMART propose 2 solutions concernant l'agrégation :



- Le faire en amont et utiliser Delphi pour l'agrégation des avis d'experts. Cette façon de procéder permet de « corriger » la dispersion. Cependant la dispersion est toujours présente et le défaut de la moyenne est toujours présent.
- Le faire en aval et utiliser « min et max » avec des analyses de sensibilités.

Enfin, Mr DAMART suggère également de regrouper les experts en panel (suivant les profils et/ou les préférences) et de regarder si les résultats changent en fonction du panel (analyse de sensibilité).

### **Les résultats**

Pour les résultats proches, il n'existe pas avec AHP de seuil de comparaison ou d'incomparabilité. Les résultats doivent être simplement expliqués à l'aide d'analyses de sensibilité. Concernant les analyses de sensibilités, Mr DAMART les juge intéressantes, mais se dit plus être un partisan des analyses de robustesse. Il recommande de faire un peu des 2.

### **Les limites**

Les limites des méthodes et notamment AHP ont été identifiées dans la littérature. Mr Damard nous recommande les travaux de Bernard ROY qui dans les années 2000 a notamment identifié les limites et critiqué cette méthode.

## Annexe 3.2 : Les experts

EXPERTS	ENTITE	REPONSE	EXPLOITABLE	DIMENSION	TYPE D'EXPERTS		
					CONSTRUCTION	CONFRONTATION	COTATION
EDF 1	Expert Management durable des déchets industriels — Groupe Territoires et Economie Circulaire	Oui	Oui	Réglementaire Technique Territoire Économie Environnement	x		x
EDF 2	Ingénieure chercheur — Groupe Territoires et Economie Circulaire	Oui	Oui		x		x
CREIDD 1	Professeur assistant —	Oui	Oui		x		x
LEMNA 1	Professeur en Sciences de Gestion Directeur IAE Nantes — Économie & Management	Oui	Oui		x		x
RECORD 1	Directrice RECORD (Réseau Coopératif de Recherche sur les Déchets et l'environnement)	Oui	Non	Économie		x	
LEMNA 2	IAE, spécialisé en innovation et éco-conception	Oui	Oui	Économie		x	x
EDF 1	Expert Management durable des déchets industriels — Groupe Territoires et Economie Circulaire	Oui	Oui	Économie		x	x
ADEME 1	Service Produits et Efficacité Matière (SPEM) Direction Economie Circulaire et Déchets (DECD)	Oui	Oui	Économie		x	x
ECO FOLIO 1	Conseil en développement et économie circulaire chez Ecofolio	Oui	Oui	Économie		x	x
FEDEREC 1	Chargé de Mission auprès de la Direction Générale	Oui	Non	Économie		x	
VEOLIA 1	Responsable Bureau d'Etudes Territoire Anjou Maine - Région Centre Ouest RECYCLAGE & VALORISATION DES DECHETS	Oui	Oui	Économie		x	x
RECORD 1	Directrice RECORD (Réseau Coopératif de Recherche sur les Déchets et l'environnement)	Oui	Non	Environnement		x	x
EDF 3	Expert Senior évaluation environnementale - Groupe Modelisation, Environnement et Bâti	Oui	Oui	Environnement		x	x
EDF 1	Expert Management durable des déchets industriels — Groupe Territoires et Economie Circulaire	Oui	Oui	Environnement		x	x
EDF 4	Chef de projet Environnement	Oui	Oui	Environnement		x	x
LEMNA 2	IAE, spécialisé en innovation et éco-conception	Oui	Oui	Environnement		x	x
IRSTEA 1	Docteur en Sciences et Génie de l'Environnement —IRSTEA · Department of Ecotechnologies	Oui	Oui	Environnement		x	x
VEOLIA 1	Responsable Bureau d'Etudes Territoire Anjou Maine - Région Centre Ouest	Oui	Oui	Environnement		x	x

Annexes du chapitre 3 : méthodologie

EXPERTS	ENTITE	REPONSE	EXPLOITABLE	DIMENSION	TYPE D'EXPERTS		
					CONSTRUCTION	CONFRONTATION	COTATION
	RECYCLAGE & VALORISATION DES DECHETS						
MINES ALES 1	Enseignant-chercheur, HDR, à l'École des Mines d'Alès	Non	Non	Environnement			
DREAL 1	DREAL Champ.Ard./SRS/PSE	Non	Non	Environnement			
FEDEREC 1	Chargé de Mission auprès de la Direction Générale	Oui	Non	Environnement		x	
CREIDD 1	Professeur assistant —	Oui	Oui	Environnement		x	x
EDF 5	Ingénieure chercheur — Groupe Modelisation, Environnement et Bâti	Oui	Oui	Réglementaire		x	x
RECORD 1	Directrice RECORD (Réseau Coopératif de Recherche sur les Déchets et l'environnement)	Oui	Non	Réglementaire		x	x
EDF 1	Expert Management durable des déchets industriels — Groupe Territoires et Economie Circulaire	Oui	Oui	Réglementaire		x	x
CAPACITÉS 1		Oui	Oui	Réglementaire		x	x
FEDEREC 1	Chargé de Mission auprès de la Direction Générale	Oui	Non	Réglementaire		x	
VEOLIA 1	Responsable Bureau d'Etudes Territoire Anjou Maine - Région Centre Ouest RECYCLAGE & VALORISATION DES DECHETS	Oui	Oui	Réglementaire		x	x
EDF 4	Chef de projet Environnement	Oui	Oui	Réglementaire		x	x
AVOCAT 1	Avocat spécialisé en droit de l'environnement	Non	Non	Réglementaire	-	-	-
ADEME 2	Direction Economie Circulaire et Déchets (DECD) Service Mobilisation et Valorisation des Déchets (SMVD)	Oui	Oui	Réglementaire		x	x
EDF 6	Ingénieure chercheur — Groupe Territoires et Economie Circulaire	Oui	Oui	Territoire		x	x
EDF 1	Expert Management durable des déchets industriels — Groupe Territoires et Economie Circulaire	Oui	Non	Territoire		x	
EIFER 2	Ingénieure chercheur —European Institute for Energy Research	Oui	Oui	Territoire		x	x
EIFER 3	Ingénieure chercheur —European Institute for Energy Research	Oui	Oui	Territoire		x	x
EIFER 4	Ingénieure chercheur —European Institute for Energy Research	Oui	Oui	Territoire		x	x
OREE 1 – 2 – 3	Chef de projet Economie Circulaire	Oui	Oui	Territoire		x	x
EDF 2	Ingénieure chercheur — Groupe Territoires et Economie Circulaire	Oui	Oui	Territoire		x	x

EXPERTS	ENTITE	REPOSE	EXPLOITABLE	DIMENSION	TYPE D'EXPERTS			
					CONSTRUCTION	CONFRONTATION	COTATION	
VEOLIA 1	Responsable Bureau d'Etudes Territoire Anjou Maine - Région Centre Ouest RECYCLAGE & VALORISATION DES DECHETS	Oui	Oui	Territoire		x	x	
IRSTEA 1	Docteur en Sciences et Génie de l'Environnement —IRSTEA · Department of Ecotechnologies	Oui	Oui	Territoire		x	x	
ADEME 3	programme d'investissement d'avenir : économie circulaire et déchet.	Oui	-	Réglementaire Technique Territoire Économie Environnement		x		
ADEME 4	déchets chimiques et explosifs, agrofourniture et recyclage des matières plastiques (efficacité matière).	Oui	-			x		
ADEME 5	recyclage et réemploi d'emballages industriels et commerciaux	Oui	-			x		
ADEME 6	Tri des déchets industriels	Oui	-			x		
ADEME 7	Éco-conception, filières REP piles et batteries	Oui	-			x		
ADEME 8	Recherche et prospective	Oui	-			x		
ADEME 9	filieres REP, écologie industrielle et déchets	Oui	-			x		
ADEME 10	Économie circulaire et écolabel européen	Oui	-			x		
INDDIGO 1	Créateur du concept des déchetteries en France et fondateur de Trivalor, devenue Inddigo, entreprise spécialisée dans le conseil en gestion des déchets (puis qui s'est également développée sur d'autres formes de conseil), à la retraite mais toujours très actif.	Oui	Non		Réglementaire Technique Territoire Économie Environnement		x	
IFSTAR	Institut Universitaire de Technologie de Saint- Nazaire — Département Génie Civil	Oui	Non		Environnement		x	
CREIDD 2	Professeur des Universités, Responsable de l'équipe Centre de Recherche et d'Etudes Interdisciplinaires sur le Développement Durable Institut Charles Delaunay	Oui	Non	Réglementaire Technique Territoire Économie Environnement	x	x		
CREIDD 3	Enseignant-Chercheur — CREIDD	Non	Non					
SDEDA		Oui	Non	Réglementaire Technique Territoire Économie Environnement		x		
EDF 7	Chef du Groupe Appui Transverse et Evacuation — Référent Déchet Conventionnel Direction des Projets Déconstruction et Déchet	Oui	-	Réglementaire Technique Territoire		x		

EXPERTS	ENTITE	REPOSE	EXPLOITABLE	DIMENSION	TYPE D'EXPERTS		
					CONSTRUCTION	CONFRONTATION	COTATION
EDF 8	Chargé d'affaires : Déchets conventionnels Direction des Projets Déconstruction et Déchet	Oui	-	Économie Environnement		x	

### Annexe 3.3 : Les critères bâtis à partir d'une échelle de ratio

Les critères construits sur cette base proposent de comparer les installations de gestion de déchets en fonction d'un paramètre qui varie en fonction du cas d'étude, par exemple les kilomètres, le coût ou encore les émissions de gaz à effet de serre.

Cette catégorie d'échelle a nécessité des adaptations de la méthode AHP pour obtenir les notes des éléments. Pour rappel, dans la littérature lorsque l'on compare deux ou plusieurs installations sur un paramètre variable (comme les kilomètres), les experts donnent leurs avis à partir des données correspondantes aux installations comparées. Par exemple, si trois installations sont comparées sur un critère de distance par rapport à un lieu de production de déchet, on obtient la matrice suivante :

	INSTALLATION I1 : 50 KM	INSTALLATION I2 : 150 KM	INSTALLATION I3 : 200 KM
Installation I1 : 50 km	1		
Installation I2 : 150 km		1	
Installation I3 : 200 km			1
....	....	....	....
Notes	a	b	c

En appliquant la démarche, les installations I<sub>1</sub>, I<sub>2</sub> et I<sub>3</sub> obtiennent respectivement les notes a, b et c.

L'évaluation des installations avec ce type de critère s'établit à partir de paramètres fortement variables d'un cas à l'autre (ici, par exemple la distance de l'installation par rapport au lieu de production du déchet). La méthodologie proposée par Saaty permet de faire ces évaluations, à la condition de faire intervenir les experts pour chaque cas d'étude alors que, nous à comparer à créer un outil polyvalent. En outre, celui-ci doit être utilisable pour plusieurs déchets, des installations de gestion de déchets variées, et sans faire intervenir les expert à chaque études de cas.

Pour lever cette problématique, nous proposons de comparer les installations de gestion de déchets sur cette catégorie de critères via la création d'une échelle de comparaison intermédiaire. Nous avons adapté la méthodologie proposée par Saaty afin de répondre à notre besoin et fait le choix de comparer ces installations en appliquant la démarche générale suivante :

*Soit deux installations I<sub>a</sub> et I<sub>b</sub>, associées respectivement aux valeurs V<sub>a</sub> et V<sub>b</sub> de la variable V qui est à minimiser et où, ici, V<sub>a</sub> < V<sub>b</sub>. Il s'agit de comparer ces deux valeurs via la formule ci-dessous :*

$$\frac{(V_a - V_b)}{V_a} * 100 = |X| \%$$

*Le résultat montre que l'installation I<sub>a</sub> est X % plus performante que l'installation I<sub>b</sub>.*

La méthode par ratio, présentée ci-dessus, permet de comparer les installations sur une échelle « évolutive » en évitant une intervention systématique des experts pour chaque cas d'étude.

Pour répondre à notre besoin, nous demandons à l'expert de différencier des poids relatifs possible issus du ratio sans unité. Pour cela, il est invité à établir la relation (et les variations) entre le résultat de la comparaison (variant de 10 en 10 de 10 % à 100 %) et l'échelle numérique de Saaty.

RESULTATS DE LA COMPARAISON	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %	90 %	≥100%
Notes de l'élément	i1	i2	i3	i4	i5	i6	i7	i8	i9	i10

Rappel : Une note  $i_n$  résultant de la comparaison entre deux installations A et B n'est pas équivalente à une note  $i_n$  résultant d'une comparaison entre les installations C et D (sauf dans le cas particulier où les variables des installations ont les mêmes valeurs numériques).

En résumé, les notes allant d' $i_1$  à  $i_{10}$  correspondent aux valeurs numériques de l'échelle verbale de Saaty définies par l'avis d'expert. Il s'agit ensuite, d'intégrer les résultats de la comparaison (note des éléments) dans une matrice de comparaison de dimension n installations (où n représente le nombre d'installations) afin d'obtenir les notes de chacune d'entre elles. Pour faciliter la compréhension du raisonnement, nous proposons l'exemple ci-dessous :

**Exemple d'application pour la comparaison de trois installations**

Soit trois installations  $I_A$ ,  $I_B$ , et  $I_C$  avec un coût respectif  $C_a$ ,  $C_b$  et  $C_c$  où  $C_a < C_b < C_c$ . nous disposons également de l'avis d'expert suivant :

RESULTATS DE LA COMPARAISON	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %	90 %	≥100%
Notes de l'élément	i1	i2	i3	i4	i5	i6	i7	i8	i9	i10
Notes de l'élément	1	1	2	3	5	6	8	8	9	9

Il s'agit de comparer les coûts via les formulations ci-dessous :

- (1)  $S_i \frac{(C_a - C_b)}{C_a} * 100 = 20\%$  alors la note associée est  $i_2$  soit 1. Les deux installations  $I_A$  et  $I_B$  ont donc un coût « équivalent » d'après l'expert.
- 
- (2)  $S_i \frac{(C_a - C_c)}{C_a} * 100 = 50\%$ . Ce ratio correspond à  $i_5$  soit la note 5. L'installation  $I_A$  est mieux, domine l'installation  $I_C$  d'après l'expert.
- 
- (3)  $S_i \frac{(C_b - C_c)}{C_b} * 100 = 70\%$ . Ce ratio correspond à  $i_7$  soit la note 8. L'installation  $I_B$  est beaucoup mieux, domine très fortement l'installation  $I_C$  d'après l'expert.

Nous obtenons alors la matrice de comparaison

	INSTALLATION IA : $C_a$ €	INSTALLATION IB : $C_b$ €	INSTALLATION IC : $C_c$ €
Installation IA : $C_a$ €	1	$i_2$	$i_5$
Installation IB : $C_b$ €	$1/i_2$	1	$i_7$
Installation IC : $C_c$ €	$1/i_5$	$1/i_7$	1

Les étapes suivantes de la démarche AHP restent inchangées.

Les critères concernés par cet aspect sont présentés dans le Tableau ci-dessous. Ce dernier précise également le(s) facteur(s) qui influence(nt) les résultats sur le critère.



<b>CRITERES DE LA DIMENSION ECONOMIQUE</b>	<b>FACTEUR(S)</b>
Ec1 — Le coût d'utilisation de la filière	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Distance (km)</li> <li>– Moyen de transport</li> <li>– Caractéristique du déchet (dangereux ou non).</li> </ul>
<b>CRITERES DE LA DIMENSION ENVIRONNEMENTALE</b>	<b>FACTEUR(S)</b>
En2 — L'impact sur le changement climatique	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Distance (km)</li> <li>– Moyen de transport</li> <li>– Procédé de l'installation</li> </ul>
Env4 — La consommation en eau	– Procédé de l'installation
Env5 — La consommation en énergie	
<b>CRITERES DE LA DIMENSION TERRITORIALE</b>	<b>FACTEUR(S)</b>
Te3.1 — L'importance du réseau de transport	– Territoire d'implantation des installations

### Annexe 3.4 : Les critères particuliers

Nous avons vu que chaque critère est composé d'éléments répartis sur une échelle de cotation. Nous proposons de déterminer les notes de ces éléments en utilisant également la méthodologie AHP. Celle-ci s'adapte à ce contexte puisqu'elle permet d'établir les notes des éléments de l'échelle et ce qu'importe le nombre d'éléments la composant. Cependant, les échelles de cotation des critères ne sont pas toutes homogènes dans leur construction. En outre, certaines échelles impliquent une modification dans la manière de prendre en compte des préférences des experts interrogés. Les parties ci-dessous illustrent l'applicabilité de la méthode AHP sur l'ensemble de nos constructions de critères et précisent les adaptations que nous avons effectuées.

Il existe deux cas particuliers ; le premier est le critère  $R_3$  – *Le respect du principe de proximité* et le second, le sous-critère  $Te_{3,2}$  *La diversité des moyens de transport du territoire*.

Ces deux critères/sous-critères reposent sur un paramètre variable, mais nous avons préféré opter pour une construction différente où l'avis d'experts n'est pas demandé pour la construction des échelles (les notes). En effet, nous avons considéré que la note est linéaire en fonction de la valeur du paramètre. Les paragraphes ci-dessous précisent leur construction.

#### Les critères construits sur la base d'échelle proportionnelle

Si deux voitures A et B ont un coût respectif de 500 € et 1000 €. Le ratio est de 50 % et on conclut que la voiture B est 2 fois plus chère que la voiture A. La note obtenue est  $I_5$ .

Les notes sont affranchies des unités de mesure de départ (Ex. : le coût en euros ou les émissions impactant le changement climatique en kilogramme équivalent  $CO_2$ ).

#### Remarque :

Les experts de construction ont remarqué qu'il est difficile de concevoir qu'une installation peut être jugée comme *deux fois meilleure qu'une autre* quand les valeurs numériques comparées sont très proches (exemple ci-dessous).

Une note  $i_5$  résultante de la comparaison entre deux voitures A et B (coût respectif de 500 € et de 1 000 €) est équivalente à une note  $i_5$  résultante d'une comparaison entre deux voitures C et D où les coûts respectifs sont 1 € et 2 €.

Les deux comparaisons (A/B) et (C/D) obtiennent une note  $i_5$  alors que les différences ne sont pas identiques et n'ont pas la même importance. En effet, dans le premier cas, la différence semble importante à prendre en compte alors que dans la seconde, elle est marginale.

La conception d'une échelle permettant de lever cette problématique nécessite d'avoir une entière connaissance des limites minimales et maximales, pour borner l'échelle de cotation. Or, il est évident que ces bornes évoluent en fonction du déchet (amiante, gravats de la déconstruction, sédiments, etc.) et de la situation géographique du producteur de déchets (distance). Nous avons donc fait le choix de garder les échelles de ratio afin de répondre au besoin d'EDF, c'est-à-dire de concevoir un outil d'aide à l'arbitrage polyvalent et indépendant vis-à-vis du déchet et la situation géographique du décideur opérationnel.

#### R3 – Respect du principe de proximité

Plutôt que de comparer les installations par un ratio à partir des distances, nous avons préféré raisonner par différence (plus facile à concevoir pour l'esprit humain). Nous avons également jugé que les résultats issus de ce critère sont linéaires et qu'il ne nécessite pas l'avis d'experts pour la construction. Cette hypothèse a été validée par les experts de construction. Pour ce faire, nous avons fixé une borne minimale (de 0 à 50 km) et

maximale ( $\geq 900$  km) à l'échelle d'évaluation. Elle est ensuite composée de huit éléments supplémentaires où chacun d'entre eux est associé à une valeur provenant de l'échelle de Saaty.

Pour placer les valeurs, on considère que, plus la distance entre le lieu de production du déchet et le lieu de gestion est grande, plus la note est dégradée, de manière linéaire. Ainsi, la borne maximum, à savoir une différence de 900 km<sup>53</sup>, est associée à la valeur 9 de l'échelle de préférence AHP de Saaty. La borne minimale est, quant à elle, une plage comprise entre 0 et 50 km. Ainsi si la différence entre deux installations est de 40 km, on considère que les deux installations sont à une distance équivalente.

Les 8 autres éléments proposés sont établis par palier de cent kilomètres où un indice de l'échelle de préférence de Saaty est associé à chacun d'eux.

RESULTAT DE LA COMPARAISON (EN KM)	DIFFERENCE DE								
	0 — 50	200	300	400	500	600	700	800	$\geq 900$
Échelle de Saaty :	1	2	3	4	5	6	7	8	9

### Tec3.2 — Diversité des moyens de transport

Ce sous-critère permet de mesurer la diversité des modes de transport présents sur le département final (routier, ferroviaire et fluvial). Pour construire ce critère, nous sommes partis du principe que le territoire idéal (avec la plus grande diversité) possède les trois modes de transport répartis équitablement, soit 1/3 chacun, sur le territoire. Nous avons jugé que les résultats issus de ce critère sont linéaires et qu'il ne nécessite pas l'avis d'experts pour la construction.

Mode de transport :	Routier	Rail	Fluvial
Représentation sur le territoire en %	33,33	33,33	33,33

Le principe de construction du sous-critère est basé sur une comparaison des régions françaises par rapport à cet idéal. Les pourcentages des moyens de transport sont obtenus à l'aide des indicateurs de flux de marchandises  $TR_{10}$  — *Transport de marchandises*

Par exemple, dans une région où 80 % du transport de marchandises se fait par route, 0 % en fluvial et 20 % en ferroviaire, le territoire obtient la note de  $|80-33|+|0-33|+|20-33|= 47 +33 +13=93$ .

Un territoire possédant une diversité idéale obtient donc la note 0. En effet, pour une région où 33 % du transport de marchandises est effectué via la route, 33 % par rail et 33 % en fluvial, on obtient alors l'équation suivante :  $|33-33|+|33-33|+|33-33|= 0 + 0 + 0 = 0$ .

En conséquence, plus le territoire s'éloigne de l'idéal, plus son score est élevé. Un territoire peut obtenir au maximum le score de 133, s'il n'a qu'un seul mode de transport, soit  $|100-33|+|0-33|+|0-33|= 67 + 33 +33 = 133$ . Il s'agit ensuite de comparer les scores obtenus de cette première étape dans une matrice de comparaison à l'aide de l'échelle linéaire (sans avis d'expert) ci-dessous

RESULTAT DE LA COMPARAISON	DIFFERENCE DE								
	$\leq 15$	$\leq 30$	$\leq 45$	$\leq 60$	$\leq 75$	$\leq 90$	$\leq 105$	$\leq 120$	$\geq 130$
échelle de Saaty :	1	2	3	4	5	6	7	8	9

<sup>53</sup> On considère qu'une différence de 900 km exprime une distance représentant les points extrêmes des frontières de la France métropolitaine.

**Exemple d'application du critère**

Nous proposons d'appliquer cette démarche sur l'exemple suivant :

INSTALLATIONS	IA	IB	IC
% DE ROUTIER	100	33,3	50
% DE FLUVIAL	0	33,3	25
% DE FERROVIAIRE	0	33,3	25
SCORES SUR 133	133	0	8,58

La différence de score entre  $I_A$  et  $I_B$  est de 133, l'indice 1/9 est alors placé dans l'intersection entre la ligne  $I_A$  et la colonne  $I_B$ . En effet, l'installation  $I_B$  est mieux que l'installation  $I_A$ . Il convient alors d'utiliser l'inverse de l'indice.

La différence entre les scores  $I_A$  et  $I_C$  est de 124,42. L'indice 1/8 est placé à l'intersection correspondante.

La différence entre les scores  $I_B$  et  $I_C$  est de 8,58. L'indice 1 est placé à l'intersection correspondante.

	INSTALLATION IA	INSTALLATION IB	INSTALLATION IC
Installation $I_A$	1	1/9	1/8
Installation $I_B$	9	1	1
Installation $I_C$	8	1	1
Total/colonne	18,00	2,11	2,13
Installation $I_A$	0,06	0,05	0,06
Installation $I_B$	0,50	0,47	0,47
Installation $I_C$	0,44	0,47	0,47
INSTALLATIONS	NOTES		
INSTALLATION IA	0,06		
INSTALLATION IB	0,49		
INSTALLATION IC	0,46		

Bien entendu, il était évident à partir des valeurs du tableau de cet exemple que l'installation  $I_B$  était la meilleure des solutions en termes de diversité des moyens de transport. La matrice de comparaison permet d'obtenir les notes normalisées de chaque installation entre 0 et 1.

## **Annexe 3.5 : Questionnaire de la dimension réglementaire**

### **Présentation de la thèse**

Dans les années 1980, la gestion des déchets qui se limitait à leur l'élimination dans la grande majorité des situations, devient aujourd'hui une gestion complexe et multidimensionnelle. Les autorités poussent les producteurs de déchets à opter pour la valorisation dans un contexte d'économie circulaire et dans l'objectif de répondre à des enjeux globaux. Pour un déchet donné, il peut y avoir plusieurs filières de gestion et, in fine, plusieurs installations capables de le gérer. Pour faire un choix, le gestionnaire de déchets doit prendre en compte les dimensions économique, environnementale, réglementaire, technique et territoriale.

Pour chacune de ces 5 dimensions, l'objectif de la thèse est de comparer les installations de gestion de déchets, en recherchant les critères nécessaires à une évaluation pour chacune des dimensions et de les agréger afin d'apporter une aide à l'arbitrage. Une liste de critères a été définie pour chaque dimension.

### **Objectif du questionnaire**

L'objectif de ce document est de recueillir les avis d'experts pour qu'ils participent pleinement à la construction des critères et de proposer une pondération entre eux, permettant une agrégation en un score unique pour **la dimension réglementaire**.

Pour construire les critères et pour l'agrégation multicritères, le travail bibliographique nous a conduits à retenir la méthode **Analytic Hierarchy Process (AHP)**. Cette méthode offre plusieurs avantages, notamment d'agréger des critères qualitatifs ou quantitatifs, mais aussi, d'avoir une flexibilité permettant en cas de modification, de ne pas remettre en cause la structure hiérarchique générale.

Pour chaque critère de la dimension, on rappelle son objectif, la question à laquelle il répond et l'échelle associée. L'échelle proposée par Saaty est disponible en *Annexe 1* de ce document. L'*Annexe 2* résume l'ensemble des critères de la dimension réglementaire sous une structure hiérarchique (proposée par la méthodologie AHP).

### **Exemple d'utilisation de la méthode AHP**

Cette partie permet d'illustrer à travers un exemple le fonctionnement de la méthode AHP. On présente la méthode sur un critère d'une autre dimension.

#### **Critère : FAVORISER L'ÉCONOMIE LOCALE (entrée dans l'installation)**

Choisir une installation de gestion de déchet permet de contribuer à son activité économique et donc à de participer au développement économique de son territoire. En effet, cette action favorise le développement et instaure une dynamique locale. Celle-ci accroît les ressources financières des collectivités locales et permet la mise en place d'actions dans des domaines qui touchent directement la population (habitat, culture, loisirs, etc.). Cette dynamique peut permettre d'élargir les possibilités d'emploi des habitants, dynamiser l'image du territoire et poser ainsi les bases du développement futur.

L'échelle détaillant les différents niveaux de ce critère permet de répondre à la question suivante :

*À quelle maille territoriale, l'économie est-elle favorisée par le choix de cette installation ?*

Nous souhaitons évaluer au travers de ce critère, la capacité de l'installation choisie à participer au développement local du territoire. Bien que les régions aient à présent les compétences sur la planification de gestion des déchets, nous avons choisi d'utiliser un découpage administratif plus fin.

Il est demandé aux experts d'évaluer le poids relatif de chacun des éléments du tableau suivant en utilisant l'échelle de préférence :

NIVEAU DE L'ÉCHELLE	LOCAL <sup>54</sup>	DEPARTEMENT	REGION	FRANCE	HORS FRANCE
	A	B	C	D	E

ÉCHELLES VERBALES	ÉCHELLES NUMERIQUES	COMMENTAIRES
Les deux éléments sont égaux	1	Deux éléments contribuent autant à la propriété
L'élément domine modérément l'autre	3	L'expérience et l'appréciation personnelles favorisent légèrement un élément par rapport à un autre
L'élément domine l'autre	5	L'expérience et l'appréciation personnelles favorisent fortement un élément par rapport à un autre
L'élément domine très fortement l'autre	7	Un élément est fortement favorisé et sa dominance est attestée dans la pratique
L'élément est absolument dominant	9	Les preuves favorisant un élément par rapport à un autre sont aussi convaincantes que possible
Les valeurs intermédiaires (2, 4, 6, 8) peuvent être utilisées pour affiner le jugement		

Il s'agit de comparer chacun des éléments de l'échelle (du critère) deux à deux (l'élément en ligne par rapport à l'élément en colonne) **uniquement dans les cases bleu** et de traduire **son jugement avec l'échelle de Saaty**. Si l'élément en ligne est plus important que celui en colonne, alors il convient d'utiliser les valeurs numériques (X) selon l'échelle de Saaty, sinon il faut inverser la valeur souhaitée (1/X).

**Exemple de questionnement :** Est-ce que gérer localement (commune, communauté de commune) le déchet va permettre de favoriser l'économie par rapport à une gestion au niveau du département ?

**Réponse :** Oui, le niveau « local » **domine modérément (est un peu plus important que ou répond un peu mieux à la problématique que ou est mieux que)**, le niveau « département ». Placer le chiffre **3** à l'intersection de la ligne et de la colonne.

FAVORISER L'ÉCONOMIE LOCALE	LOCAL	DEPARTEMENT	REGION	FRANCE	HORS FRANCE
Local	1,00	3	3	5	9
Département	X	1,00			
Région	X	X	1,00		
France	X	X	X	1,00	
Hors France	X	X	X	X	1,00

<sup>54</sup> Échelle communale, regroupement de communes.

Il faut appliquer la même démarche pour chacune des intersections ligne-colonne, représentées par des cases vertes dans le tableau ci-dessus. Il est très important pour la qualité des travaux, de donner **les justifications de la pondération**. Ces justifications permettent de comprendre l'avis de l'expert et sa sensibilité.

**Exemple de justifications :** « En ce qui concerne l'économie, il existe une grande différence entre une installation présente sur le territoire français et une autre située hors de France. Ce sont 2 économies distinctes ».

### Questionnaire pour la construction des critères de la dimension réglementaire

Pour chaque critère de la dimension, on rappelle son objectif, la question à laquelle il répond et l'échelle associée. L'échelle proposée par Saaty est disponible dans la partie ci-dessus et en *annexe 1* de ce document. Un résumé de l'ensemble des critères de la dimension réglementaire sous une structure hiérarchique (proposée par la méthodologie AHP) est disponible en *annexe 2* de ce questionnaire.

#### Critère 1 : Le respect de la hiérarchie de gestion des déchets

Nous cherchons, via ce critère, à évaluer l'installation de gestion des déchets par rapport à son positionnement vis-à-vis de la hiérarchie de gestion des déchets. L'échelle détaillant les différents niveaux de ce critère permet de répondre à la question ci-dessous : *Comment se positionne l'installation envisagée par rapport à la hiérarchie de gestion des déchets ?*

Dans le cadre de la thèse, nous appliquons la hiérarchie de gestion des déchets adoptée par le Code de l'environnement. Néanmoins, nous avons fait le choix de scinder en deux parties le niveau « valoriser » pour distinguer la valorisation matière de la valorisation énergétique. La valorisation matière doit être privilégiée dans la mesure du possible (technique, environnementale et économique) à la valorisation énergétique.

Nous avons construit ce critère avec l'échelle ci-dessous :

NIVEAU DE L'ECHELLE	REUTILISATION	RECYCLAGE	VALORISATION MATIERE	VALORISATION ENERGETIQUE	ÉLIMINATION
Notes des éléments de l'échelle	A	B	C	D	E

Le travail de l'expert consiste à établir les pondérations de chacun des éléments de l'échelle

Exemple de questionnement : Est-ce que le niveau « *préparation en vue de la réutilisation* » est plus important que le « *recyclage* » ? Et dans quelle proportion ?

Il s'agit d'appliquer ce même raisonnement pour chacun des éléments.

	PREPARATION EN VUE DE LA REUTILISATION	RECYCLAGE	VALORISATION MATIERE	VALORISATION ENERGETIQUE	ÉLIMINATION
Préparation en vue de la réutilisation	1				
Recyclage		1			
Valorisation Matière			1		
Valorisation énergétique				1	
Élimination					1

**Justifications :**



**Critère 2 : Le niveau de responsabilité du producteur**

Nous cherchons, via ce critère, à évaluer si la responsabilité du producteur de déchets, en fonction de l'installation envisagée, est toujours engagée. L'échelle proposée permet de répondre à la question suivante : *La responsabilité du producteur est-elle engagée en sortie d'installation ?*

ELEMENTS DE L'ECHELLE	NON, ELLE N'EST PAS ENGAGEE	OUI, ELLE EST ENGAGEE	« JE NE SAIS PAS »
Notes des éléments de l'échelles	A	B	C

Le travail de l'expert consiste à établir les pondérations de chacun des éléments de l'échelle

**Exemple de questionnement :** Est-ce que l'élément « *Non, elle n'est pas engagée* » est plus important, mieux que l'élément « *Oui, elle est engagée* » ? Et dans quelle mesure ?

Il s'agit d'appliquer ce même raisonnement pour chacun des éléments en ligne avec celui en colonne (case verte). Nous vous proposons d'indiquer vos préférences dans le tableau suivant :

	NON, ELLE N'EST PAS ENGAGEE	OUI, ELLE EST ENGAGEE	« JE NE SAIS PAS »
Non, elle n'est pas engagée	1		
Oui, elle est engagée		1	
« Je ne sais pas »			1

**Justifications :****Critère 3 : Le respect du principe de proximité**

L'article 16 de la directive-cadre portant sur les déchets, et le point 4 de l'article Article L541-1 du Code de l'environnement précisent que le déchet doit être valorisé ou éliminé dans l'une des installations appropriées les plus proches afin de respecter un principe de proximité.

Contrairement aux critères précédents, celui-ci est construit sur une échelle continue : la distance parcourue par le déchet entre son lieu de production et le lieu de valorisation ou d'élimination. Ainsi, la distance à parcourir (en kilomètres) entre les différentes possibilités permet de répondre à la question suivante :

*Est-ce que l'installation choisie répond au principe de proximité ?*

Nous avons jugé que les résultats issus de ce critère sont linéaires et ne nécessitent pas l'avis d'experts pour la comparaison. On considère que, plus la distance entre le lieu de production du déchet et le lieu de gestion est grande, plus la note est dégradée, de manière linéaire.

**Critère 4 : Le positionnement vis-à-vis des objectifs de valorisation**

Nous cherchons, au travers ce critère, à évaluer le respect de la politique de gestion des déchets (envoi d'un déchet vers une installation) par rapport aux objectifs de valorisation. L'échelle que nous proposons permet de répondre à la question ci-dessous :

*L'installation envisagée permet-elle de répondre aux objectifs de valorisation ?*

Pour choisir les filières de traitements adéquates vis-à-vis de la réglementation et répondre aux exigences de la Politique Développement Durable de l'Entreprise, EDF s'est dotée d'un Référentiel Technique de gestion des déchets conventionnels d'EDF SA. Il se compose de plusieurs outils :

- Guide déchets,

- Application OGIDE,
- Macro d'analyse Excel.

Ces outils reposent sur la liste nationale des déchets conventionnels produits par EDF. Cette liste se présente sous la forme d'un tableur Excel qui recense, pour chaque déchet évacué par les sites, les filières de traitements adéquates vis-à-vis de la réglementation et des exigences de la Politique Développement Durable d'EDF SA. En effet, il existe des objectifs européens, nationaux, et des objectifs propres aux entreprises. Ce référentiel, reprend les orientations européennes et nationales et est également, dans certains cas, plus exigeants que les objectifs définis par les pouvoirs publics.

Liste des déchets de la liste verte : v					VALORISATION													ELIMINATION						
Code Interne	NATURE DU DECHET	liste verte	déchets réglementés	Code E.U.	R 1	R 2	R 3	R 4	R 5	R 6	R 7	R 8	R 9	R 10	R 11	R 12	R 13	D 5	D 8	D 9	D 10	D 13	D 14	D 15
95	a	Emballages - Papiers et cartons (non pollués)	v	* DIB	15.01.01																			

Type de gestion CORRECTE

Type de gestion ACCEPTABLE

Type de gestion INTERDITE

Type de gestion non appropriée

D1 Déchets Inertes

D1 Déchets Industriels

B Banals

D Déchets Dangereux

L'idée est d'utiliser ce référentiel et de l'adapter en critère. Il s'agit de positionner les installations étudiées pour un déchet donné, en se basant sur les codes R et D de la directive-cadre, sur l'échelle ci-dessous :

ELEMENTS DE L'ECHELLE	LA FILIERE EST CORRECTE	LA FILIERE EST ACCEPTABLE	LA FILIERE EST DECONSEILLEE	INAPPROPRIEE/INTERDITE
Commentaire	Filière autorisée répondant aux objectifs.	Filière autorisée, mais avec peu de valeur ajoutée (voire nulle) pour répondre aux objectifs	Filière autorisée, mais en contradiction avec les objectifs	Filière non autorisée
Notes des éléments de l'échelle	A	B	C	

Remarque : Les 3 possibilités étudiées (Correcte, Acceptable et Déconseillée) respectent la réglementation.

Le travail de l'expert consiste à établir les pondérations de chacun des éléments de l'échelle d'évaluation

Exemple de questionnement : Est-ce que l'élément « la filière est correcte (autorisée, répondant aux objectifs) » est plus important, mieux que l'élément « la filière est déconseillée, autorisée, mais en contradiction avec les objectifs », et dans quelle proportion ?

Il s'agit d'appliquer ce même raisonnement pour chacun des éléments en ligne avec celui en colonne (case verte).

Nous vous proposons d'indiquer vos préférences dans le tableau suivant :

	LA FILIERE EST CORRECTE	LA FILIERE EST ACCEPTABLE	LA FILIERE EST DECONSEILLEE	FILIERE INAPPROPRIEE
Filière correcte	1			
Filière acceptable		1		
Filière interdite			1	
Filière inappropriée				1

**Justifications :**

### Questionnaire pour l'obtention des poids des critères

Cette étape va permettre de définir l'importance des critères, les uns par rapport aux autres et ainsi obtenir le poids de chacun d'entre eux. Celui-ci sert à l'agrégation multicritères et permet d'obtenir un score<sup>55</sup> évaluant la dimension réglementaire.

CRITERES DE LA DIMENSION REGLEMENTAIRE	POIDS
Le respect de la hiérarchie de gestion des déchets	A
Le niveau de responsabilité du producteur	B
Le respect du principe de proximité	C
Le positionnement de la gestion par rapport aux objectifs de valorisation	D

Le travail de l'expert consiste à établir les poids (A, B, C et D) des critères de la dimension réglementaire.

Exemple de questionnement : *Est-ce que le critère « Le respect de la hiérarchie de gestion des déchets » est plus important que le critère « Le respect du principe de proximité » ? Et dans quelle proportion ?*

Nous vous proposons d'indiquer vos préférences dans le tableau ci-dessous :

	LE RESPECT DE LA HIERARCHIE DE GESTION DES DECHETS	LE NIVEAU DE RESPONSABILITE DU PRODUCTEUR	LE RESPECT DU PRINCIPE DE PROXIMITE	LE POSITIONNEMENT DE LA GESTION PAR RAPPORT AUX OBJECTIFS DE VALORISATION
Le respect de la hiérarchie de gestion des déchets	1			
Le niveau de responsabilité du producteur		1		
Le respect du principe de proximité			1	
Le positionnement de la gestion par rapport aux objectifs de valorisation				1

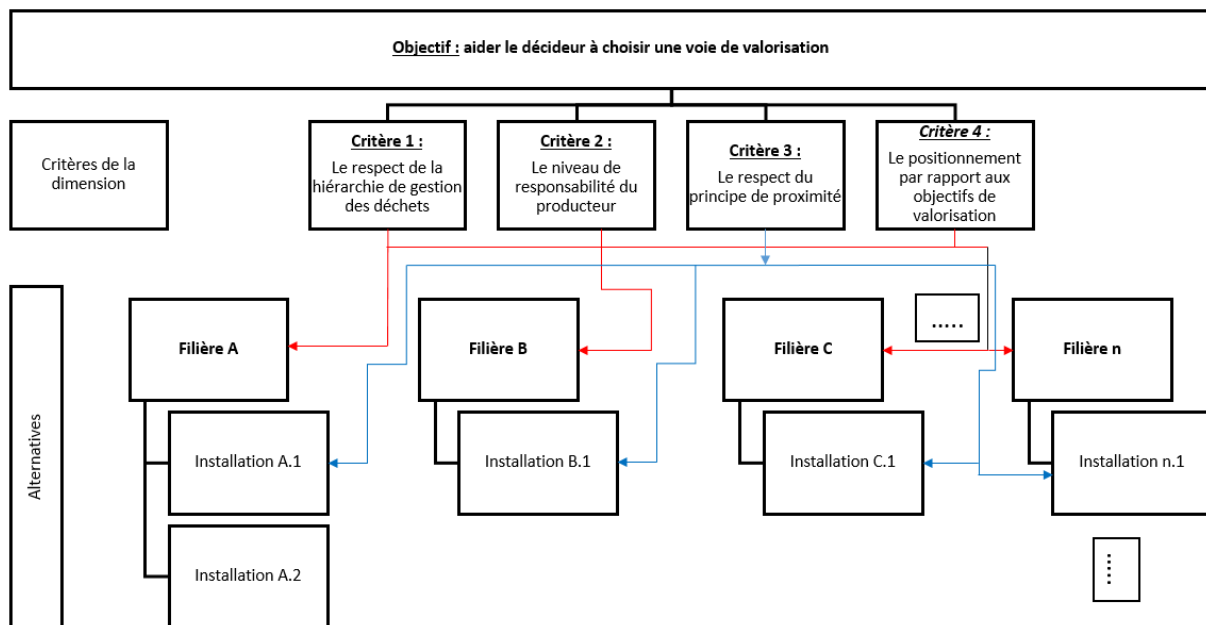
**Justifications :**

<sup>55</sup> Le score est calculé en multipliant le poids du critère avec la note que l'installation a obtenue sur l'échelle de ce même critère. Le score final, évaluant la dimension réglementaire, est calculé à partir de la somme des scores obtenus par l'installation sur chacun des critères de cette dimension.

**Annexe 1 du questionnaire : Échelle proposée par Saaty :**

ÉCHELLES VERBALES	ÉCHELLES NUMÉRIQUES	COMMENTAIRES
Les deux éléments sont égaux	1	Deux éléments contribuent autant à la propriété
L'élément domine modérément l'autre	3	L'expérience et l'appréciation personnelles favorisent légèrement un élément par rapport à un autre
L'élément domine l'autre	5	L'expérience et l'appréciation personnelles favorisent fortement un élément par rapport à un autre
L'élément domine très fortement l'autre	7	Un élément est fortement favorisé et sa dominance est attestée dans la pratique
L'élément est absolument dominant	9	Les preuves favorisant un élément par rapport à un autre sont aussi convaincantes que possible
Les valeurs intermédiaires (2, 4, 6, 8) peuvent être utilisées pour affiner le jugement		

**Annexe 2 du questionnaire : Structure AHP des critères de la dimension réglementaire**



**Annexe 3 du questionnaire : définitions**

**Réutilisation :** Toute opération par laquelle des substances, matières ou produits qui sont devenus des déchets sont utilisés de nouveau

**Recyclage :** Ce terme désigne toute opération de valorisation par laquelle les déchets, y compris les déchets organiques, sont retraités en substances, matières ou produits aux fins de leur fonction initiale.

**Valorisation Matière :**

La valorisation matière désigne toute opération dont le résultat principal est que des déchets servent à des fins utiles en substitution à d'autres substances, matières ou produits qui auraient été utilisés à une fin particulière, ou que des déchets soient préparés pour être utilisés à cette fin, y compris par le producteur de déchets. On parle de « down-cycling » où, comparé au recyclage, il y a un usage dégradé et in fine une perte de la valeur ajoutée de la matière.

**Valorisation énergétique :**

La valorisation énergétique réside en l'incinération de déchets non dangereux respectant les conditions définies à l'article 33-2 de l'arrêté du 20 septembre 2002 modifié relatif aux installations d'incinération et de co-incinération de déchets non dangereux et aux installations incinérant des déchets d'activités de soins à risques infectieux. Lorsque le rendement énergétique de l'installation est trop faible, on ne peut pas parler de valorisation énergétique, mais uniquement de « production énergétique ».

**Élimination :** 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'énergi.

## Annexe 3.6 : Questionnaire de la dimension économique

### Présentation de la thèse

Dans les années 1980, la gestion des déchets qui se limitait à leur l'élimination dans la grande majorité des situations, devient aujourd'hui une gestion complexe et multidimensionnelle. Les autorités poussent les producteurs de déchets à opter pour la valorisation dans un contexte d'économie circulaire et dans l'objectif de répondre à des enjeux globaux. Pour un déchet donné, il peut y avoir plusieurs filières de gestion et, in fine, plusieurs installations capables de le gérer. Pour faire un choix, le gestionnaire de déchets doit prendre en compte les dimensions économique, environnementale, réglementaire, technique et territoriale.

Pour chacune de ces 5 dimensions, l'objectif de la thèse est de comparer les installations de gestion de déchets, en recherchant les critères nécessaires à une évaluation pour chacune des dimensions et de les agréger afin d'apporter une aide à l'arbitrage. Une liste de critères a été définie pour chaque dimension.

### Objectif du questionnaire

L'objectif de ce document est de recueillir les avis d'experts pour qu'ils participent pleinement à la construction des critères et de proposer une pondération entre eux, permettant une agrégation en un score unique pour **la dimension réglementaire**.

Pour construire les critères et pour l'agrégation multicritères, le travail bibliographique nous a conduits à retenir la méthode **Analytic Hierarchy Process (AHP)**. Cette méthode offre plusieurs avantages, notamment d'agréger des critères qualitatifs ou quantitatifs, mais aussi, d'avoir une flexibilité permettant en cas de modification, de ne pas remettre en cause la structure hiérarchique générale.

Pour chaque critère de la dimension, on rappelle son objectif, la question à laquelle il répond et l'échelle associée. L'échelle proposée par Saaty est disponible en *Annexe 1* de ce document. L'*Annexe 2* résume l'ensemble des critères de la dimension économique sous une structure hiérarchique (proposée par la méthodologie AHP).

### Exemple d'utilisation de la méthode AHP

Cette partie permet d'illustrer à travers un exemple le fonctionnement de la méthode AHP. On présente la méthode sur un critère d'une autre dimension.

#### **Critère : FAVORISER L'ÉCONOMIE LOCALE (entrée dans l'installation)**

Choisir une installation de gestion de déchet permet de contribuer à son activité économique et donc à de participer au développement économique de son territoire. En effet, cette action favorise le développement et instaure une dynamique locale. Celle-ci accroît les ressources financières des collectivités locales et permet la mise en place d'actions dans des domaines qui touchent directement la population (habitat, culture, loisirs, etc.). Cette dynamique peut permettre d'élargir les possibilités d'emploi des habitants, dynamiser l'image du territoire et poser ainsi les bases du développement futur.

L'échelle détaillant les différents niveaux de ce critère permet de répondre à la question suivante :

*À quelle maille territoriale, l'économie est-elle favorisée par le choix de cette installation ?*

Nous souhaitons évaluer au travers de ce critère, la capacité de l'installation choisie à participer au développement local du territoire. Bien que les régions aient à présent les compétences sur la planification de gestion des déchets, nous avons choisi d'utiliser un découpage administratif plus fin.

Il est demandé aux experts d'évaluer le poids relatif de chacun des éléments du tableau suivant en utilisant l'échelle de préférence :

NIVEAU DE L'ÉCHELLE	LOCAL <sup>56</sup>	DEPARTEMENT	REGION	FRANCE	HORS FRANCE
	A	B	C	D	E

ÉCHELLES VERBALES	ÉCHELLES NUMERIQUES	COMMENTAIRES
Les deux éléments sont égaux	1	Deux éléments contribuent autant à la propriété
L'élément domine modérément l'autre	3	L'expérience et l'appréciation personnelles favorisent légèrement un élément par rapport à un autre
L'élément domine l'autre	5	L'expérience et l'appréciation personnelles favorisent fortement un élément par rapport à un autre
L'élément domine très fortement l'autre	7	Un élément est fortement favorisé et sa dominance est attestée dans la pratique
L'élément est absolument dominant	9	Les preuves favorisant un élément par rapport à un autre sont aussi convaincantes que possible
Les valeurs intermédiaires (2, 4, 6, 8) peuvent être utilisées pour affiner le jugement		

Il s'agit de comparer chacun des éléments de l'échelle (du critère) deux à deux (l'élément en ligne par rapport à l'élément en colonne) **uniquement dans les cases bleu** et de traduire **son jugement avec l'échelle de Saaty**. Si l'élément en ligne est plus important que celui en colonne, alors il convient d'utiliser les valeurs numériques (X) selon l'échelle de Saaty, sinon il faut inverser la valeur souhaitée (1/X).

**Exemple de questionnement :** Est-ce que gérer localement (commune, communauté de commune) le déchet va permettre de favoriser l'économie par rapport à une gestion au niveau du département ?

**Réponse :** Oui, le niveau « local » **domine modérément (est un peu plus important que ou répond un peu mieux à la problématique que ou est mieux que)**, le niveau « département ». Placer le chiffre **3** à l'intersection de la ligne et de la colonne.

FAVORISER L'ÉCONOMIE LOCALE	LOCAL	DEPARTEMENT	REGION	FRANCE	HORS FRANCE
Local	1,00	3	3	5	9
Département	X	1,00			
Région	X	X	1,00		
France	X	X	X	1,00	
Hors France	X	X	X	X	1,00

<sup>56</sup> Échelle communale, regroupement de communes.

Il faut appliquer la même démarche pour chacune des intersections ligne-colonne, représentées par des cases vertes dans le tableau ci-dessus. Il est très important pour la qualité des travaux, de donner **les justifications de la pondération. Ces justifications permettent de comprendre l'avis de l'expert et sa sensibilité.**

**Exemple de justifications :** « En ce qui concerne l'économie, il existe une grande différence entre une installation présente sur le territoire français et une autre située hors de France. Ce sont 2 économies distinctes ».

### Questionnaire pour la construction des critères de la dimension économique.

Pour chaque critère de la dimension, on rappelle son objectif, la question à laquelle il répond et l'échelle associée. L'échelle verbale proposée par Saaty est disponible en *annexe 1 de ce questionnaire*. L'*annexe 2* résume l'ensemble des critères de la dimension économique sous une structure hiérarchique (proposée par la méthodologie AHP).

Cette partie décrit brièvement les 3 critères retenus pour évaluer cette dimension. Nous proposons 3 critères inspirés des écrits de Porter<sup>57</sup> (cinq forces de Porter<sup>58</sup>) pour cette dimension. Ce cadre d'analyse doit toutefois être adapté pour deux raisons :

- L'analyse des cinq forces est adaptée pour analyser un marché (de produits et de services) où se rencontrent une offre et une demande. Un déchet, s'il doit être éliminé, ne peut être considéré comme un produit que des clients vont acheter.
- Même si un déchet, une fois retraité, peut être revendu comme matière secondaire, et donc être considéré comme un produit, il est le résultat d'une autre activité principale. On ne peut donc pas envisager de réduire ou d'augmenter les quantités de déchet produites pour s'adapter à une demande.

#### Critère 1 : Le coût d'utilisation de l'installation.

Les gestionnaires de déchets ont le choix entre différentes orientations pour gérer leurs déchets. Ils peuvent mettre en place des mesures pour réduire les déchets à la source, les réemployer, les recycler, ou les valoriser. Un coût est associé à chacune de ces possibilités. Nous cherchons à évaluer, par la voie de ce critère, le coût final d'utilisation de l'installation envisagée comparativement aux autres solutions proposées.

Ce critère permet de répondre à la question suivante : *Quel est le coût<sup>59</sup> de l'installation de gestion envisagée ?*

Ce critère est construit sur la base d'une échelle continue. En effet, le coût dépend à la fois de l'installation choisie, du transport (distance entre le lieu de production du déchet et son lieu de valorisation ou d'élimination), mais aussi du moyen de transport utilisé. La méthodologie proposée par Saaty permet la comparaison, à la condition de faire intervenir les experts pour chaque cas d'étude. Or, nous cherchons à comparer les installations, sans leurs interventions à chaque étude. Nous avons donc fait le choix de comparer ces installations via la démarche suivante :

*Soit 2 installations A et B, avec un coût respectif  $C_a$  et  $C_b$  où  $C_a < C_b$ . Il s'agit de comparer les coûts via la formulation ci-dessous :*

---

<sup>57</sup> Michael Porter, est professeur de stratégie d'entreprise à l'Université Harvard et consultant d'entreprise. Il est célèbre pour son analyse de la façon dont une entreprise peut obtenir un avantage concurrentiel (ou avantage compétitif) en maîtrisant mieux que ses concurrents les forces qui structurent son environnement concurrentiel

<sup>58</sup> Selon Porter, cinq forces déterminent la structure concurrentielle d'une industrie de biens ou de services : l'intensité de la concurrence, les nouveaux entrants, le pouvoir de négociation des clients, le pouvoir de négociation des fournisseurs et les produits de substitution.

<sup>59</sup> Le coût inclut le(s) traitement(s) et le transport.



$$\frac{(Ca - Cb)}{Ca} * 100 = - X\%$$

Le résultat montre que l'installation A propose un coût inférieur, de X % par rapport à celui proposé par l'installation B.

La méthode par ratio, présentée ci-dessus, permet de comparer les installations (premier objectif) sur une échelle « évolutive » en évitant une intervention systématique des experts pour chaque cas d'étude. On demande à l'expert de différencier des poids relatifs issus du ratio sans unité et d'établir la relation entre ce résultat de la comparaison (— 10 %, — 20 %, etc.) et l'échelle de Saaty.

Il s'agit ici, pour l'expert, d'établir la relation (et les variations) entre les résultats possibles de la comparaison (A, B, C, D, E, F, G, H et I) et l'échelle de Saaty.

Exemple de questionnement : Est-ce qu'un résultat montrant que l'une des deux installations comparées a un coût « 30 % moins élevé » que la seconde est un peu mieux, mieux, beaucoup mieux ou absolument mieux ? Existe-t-il un seuil (représenté ici, par un pourcentage) à partir duquel, vous considérez qu'une installation est absolument mieux que la seconde ?

RESULTAT DE LA COMPARAISON	-10 %	-20 %	-30 %	-40 %	-50 %	-60 %	-70 %	-80 %	-90 %	≥ -100%
Score de Saaty :										

### Justifications :

#### Critère 2 : L'intensité concurrentielle de la filière

Nous cherchons à évaluer, via ce critère, l'intensité concurrentielle du marché de la filière<sup>60</sup> de gestion envisagée. Il s'agit pour ce critère de répondre à la question suivante : *Quelle est l'intensité concurrentielle de la filière ?*

Dans un contexte de gestion des déchets, où l'objectif principal est de comparer plusieurs filières, l'échelle permet de mesurer le rapport de force théorique entre le producteur de déchets, et les fournisseurs de service (valorisation et élimination). L'échelle de construction part du même principe que celle proposée par le référentiel de Bercy, mais adaptée à un contexte de gestion des déchets.

Ce critère propose d'évaluer l'intensité concurrentielle des acteurs possibles pour un déchet donné, en mesurant le nombre d'installations (concurrentes), dans une même filière, capables d'accepter le déchet. S'il n'y a pas de concurrent alors, il n'y a pas d'intensité concurrentielle. Une installation est comptée à la condition que celle-ci puisse prendre en charge la totalité le tonnage du déchet produit. Nous avons défini une échelle par palier allant de 1 à plus de 10 concurrents. Les concurrents représentent ici, le nombre d'installations par filière.

NOMBRE D'INSTALLATIONS	≥ 10	≥ 5	≥ 3	1	0
Note des éléments de l'échelle	A	B	C	D	E

<sup>60</sup> Nous définissons une filière de gestion des déchets comme l'ensemble des installations, d'un même procédé de traitement, présent sur un périmètre donné. Exemple : En France, il existe 1 filière d'installation de stockage de déchets dangereux (ISDD), composée de 16 installations.

À travers le tableau ci-dessus, nous cherchons à mesurer les notes des éléments proposés ( $\geq 10$ ,  $\geq 5$ ,  $\geq 3$  et 1 installation concurrente). Le travail de l'expert consiste à établir les pondérations de chacun des éléments de l'échelle d'évaluation.

Exemple de questionnement : Est-ce que le niveau «  $\geq 10$  » est mieux que le niveau «  $\geq 3$  » ? Et dans quelle proportion ? Il s'agit d'appliquer ce même raisonnement pour chacun des éléments.

NOMBRE D'INSTALLATIONS	$\geq 10$	$\geq 5$	$\geq 3$	1
$\geq 10$	1			
$\geq 5$		1		
$\geq 3$			1	
1				1

**Justifications :**

**Critère 3 : L'intensité de la demande de la filière**

Les filières ont toutes des capacités de traitements différentes, dépendantes du nombre et du type d'installation. Chaque filière a une demande annuelle en déchet, nécessaire pour garantir son fonctionnement, qu'il faut mettre en relation avec la quantité de déchets à gérer. Ce critère a pour objectif de comparer l'intensité de la demande, sur une année, du marché lié au déchet étudié par rapport aux filières envisagées.

L'échelle détaillant les différents niveaux de ce critère permet de répondre à la question ci-dessous : *Quelle est la capacité de la filière à traiter la demande ?*

ÉLÉMENT DE L'ECHELLE	FILIERE AVEC DES CAPACITES EXCEDENTAIRES	FILIERE A L'EQUILIBRE	FILIERE SOUS TENSION (CAPACITES INFERIEURES AUX VOLUMES A TRAITER)
Note des éléments de l'échelle	A	B	C

Il s'agit de vérifier si les capacités de traitement de la filière<sup>61</sup> sont :

- Excédentaires (peuvent accueillir sans investissements supplémentaires des volumes supplémentaires)
- Équilibrées
- Limitées (inférieures à la quantité potentielle de déchets)

Le travail de l'expert consiste à établir les pondérations de chacun des éléments de l'échelle ci-dessus

Exemple de questionnement : Est-ce que le niveau « *Filière avec des capacités excédentaires* » est mieux que le niveau « *Filière à l'équilibre* » ? Si oui, dans quelle proportion ? Il s'agit d'appliquer ce même raisonnement pour chacun des éléments.

<sup>61</sup> Somme des capacités des installations de cette filière.

	FILIERE AVEC DES CAPACITES EXCEDENTAIRES	FILIERE A L'EQUILIBRE	FILIERE SOUS TENSION (CAPACITES INFERIEURES AUX VOLUMES A TRAITER)
Filière avec des capacités excédentaires	1		
Filière à l'équilibre		1	
Filière sous tension (capacités inférieures aux volumes à traiter)			1

**Justifications :**

### Questionnaire pour l'obtention des poids des critères

Cette étape va permettre de définir l'importance des critères, les uns par rapport aux autres et ainsi obtenir **le poids** de chacun d'entre eux. Celui-ci sert à l'agrégation multicritères et permet d'obtenir un score<sup>62</sup> évaluant la dimension économique.

CRITERES DE LA DIMENSION ECONOMIQUE	POIDS
Le coût d'utilisation de la filière	A
L'intensité concurrentielle	B
L'intensité de la demande	C

Le travail de l'expert permet d'obtenir les poids (A, B, et C) des critères de la dimension économique, en utilisant la méthode AHP.

Exemple de questionnement : *Est-ce que le critère « Le coût d'utilisation de la filière » est plus important que le critère « L'intensité de la demande », et si oui, dans quelle proportion ?* Nous vous proposons d'indiquer vos préférences dans le tableau ci-dessous :

	LE COUT D'UTILISATION DE LA FILIERE	L'INTENSITE CONCURRENTIELLE	L'INTENSITE DE LA DEMANDE
Le coût d'utilisation de la filière	1		
L'intensité concurrentielle		1	
L'intensité de la demande			1

**Justifications :**

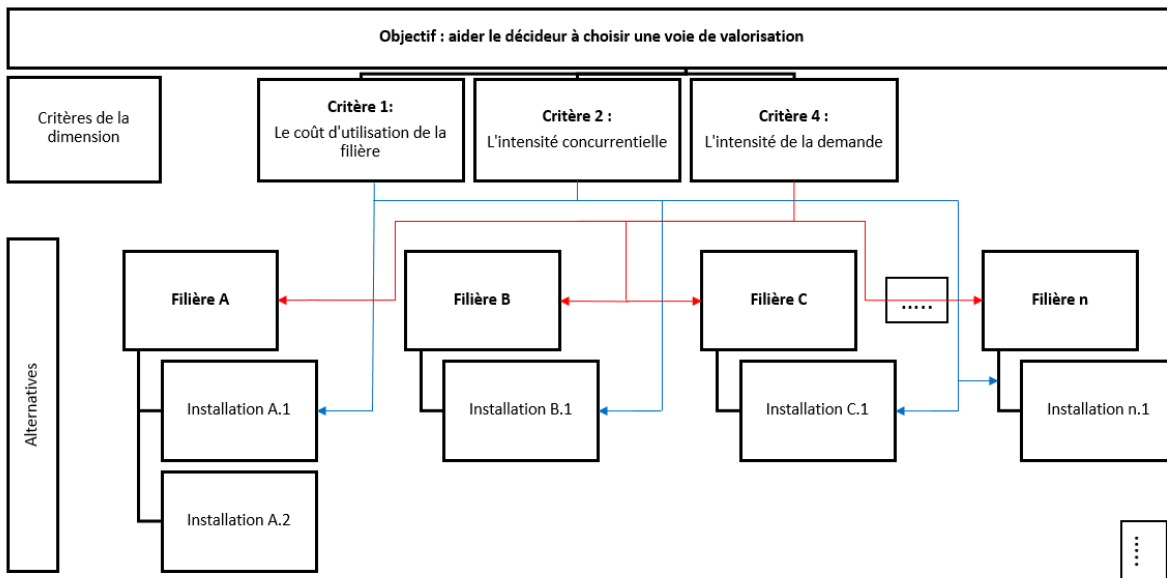
<sup>62</sup> Le score est calculé en multipliant le poids du critère avec la note que l'installation a obtenue sur l'échelle de ce même critère. Le score final, évaluant la dimension réglementaire, est calculé à partir de la somme des scores obtenus par l'installation sur chacun des critères de cette dimension.

**Annexe 1 du questionnaire : Échelle proposée par Saaty :**

ÉCHELLES VERBALES	ÉCHELLES NUMERIQUES	COMMENTAIRES
Les deux éléments sont égaux	1	Deux éléments contribuent autant à la propriété
L'élément domine modérément l'autre	3	L'expérience et l'appréciation personnelles favorisent légèrement un élément par rapport à un autre
L'élément domine l'autre	5	L'expérience et l'appréciation personnelles favorisent fortement un élément par rapport à un autre
L'élément domine très fortement l'autre	7	Un élément est fortement favorisé et sa dominance est attestée dans la pratique
L'élément est absolument dominant	9	Les preuves favorisant un élément par rapport à un autre sont aussi convaincantes que possible

Les valeurs intermédiaires (2, 4, 6, 8) peuvent être utilisées pour affiner le jugement

**Annexe 2 du questionnaire : Structure AHP des critères de la dimension économique**



## Annexe 3.7 : Questionnaire de la dimension territoriale

### Présentation de la thèse

Dans les années 1980, la gestion des déchets qui se limitait à leur l'élimination dans la grande majorité des situations, devient aujourd'hui une gestion complexe et multidimensionnelle. Les autorités poussent les producteurs de déchets à opter pour la valorisation dans un contexte d'économie circulaire et dans l'objectif de répondre à des enjeux globaux. Pour un déchet donné, il peut y avoir plusieurs filières de gestion et, in fine, plusieurs installations capables de le gérer. Pour faire un choix, le gestionnaire de déchets doit prendre en compte les dimensions économique, environnementale, réglementaire, technique et territoriale.

Pour chacune de ces 5 dimensions, l'objectif de la thèse est de comparer les installations de gestion de déchets, en recherchant les critères nécessaires à une évaluation pour chacune des dimensions et de les agréger afin d'apporter une aide à l'arbitrage. Une liste de critères a été définie pour chaque dimension.

### Objectif du questionnaire

L'objectif de ce document est de recueillir les avis d'experts pour qu'ils participent pleinement à la construction des critères et de proposer une pondération entre eux, permettant une agrégation en un score unique pour **la dimension réglementaire**.

Pour construire les critères et pour l'agrégation multicritères, le travail bibliographique nous a conduits à retenir la méthode **Analytic Hierarchy Process (AHP)**. Cette méthode offre plusieurs avantages, notamment d'agréger des critères qualitatifs ou quantitatifs, mais aussi, d'avoir une flexibilité permettant en cas de modification, de ne pas remettre en cause la structure hiérarchique générale.

Pour chaque critère de la dimension, on rappelle son objectif, la question à laquelle il répond et l'échelle associée. L'échelle proposée par Saaty est disponible en *Annexe 1* de ce document. L'*Annexe 2* résume l'ensemble des critères de la dimension territoriale sous une structure hiérarchique (proposée par la méthodologie AHP).

### Exemple d'utilisation de la méthode AHP

Cette partie permet d'illustrer à travers un exemple le fonctionnement de la méthode AHP. On présente la méthode sur un critère d'une autre dimension.

#### Critère : Le respect de la hiérarchie de gestion des déchets

Nous cherchons, via ce critère, à évaluer l'installation de gestion des déchets par rapport à son positionnement vis-à-vis de la hiérarchie de gestion des déchets. L'échelle détaillant les différents niveaux de ce critère permet de répondre à la question ci-dessous : *Comment se positionne l'installation envisagée par rapport à la hiérarchie de gestion des déchets ?*

Dans le cadre de la thèse, nous appliquons la hiérarchie de gestion des déchets adoptée par le Code de l'environnement. Néanmoins, nous avons fait le choix de scinder en deux parties le niveau « valoriser » pour distinguer la valorisation matière de la valorisation énergétique. La valorisation matière doit être privilégiée dans la mesure du possible (technique, environnementale et économique) à la valorisation énergétique. demandé aux experts d'évaluer le poids relatif de chacun des éléments du tableau suivant en utilisant l'échelle de préférence :

NIVEAU DE L'ECHELLE	REUTILISATION	RECYCLAGE	VALORISATION MATIERE	VALORISATION ENERGETIQUE	ÉLIMINATION
notes des éléments de l'échelle	A	B	C	D	E

ÉCHELLE VERBALE	ÉCHELLE NUMERIQUE (X)	COMMENTAIRES
Les deux éléments sont égaux	1	Deux éléments contribuent autant à la propriété
L'élément domine modérément l'autre	3	L'expérience et l'appréciation personnelles favorisent légèrement un élément par rapport à un autre
L'élément domine l'autre	5	L'expérience et l'appréciation personnelles favorisent fortement un élément par rapport à un autre
L'élément domine très fortement l'autre	7	Un élément est fortement favorisé et sa dominance est attestée dans la pratique
L'élément est absolument dominant	9	Les preuves favorisant un élément par rapport à un autre sont aussi convaincantes que possible
Les valeurs intermédiaires (2, 4, 6, 8) peuvent être utilisées pour affiner le jugement		

Il s'agit de comparer chacun des éléments de l'échelle (du critère) deux à deux (l'élément en ligne par rapport à l'élément en colonne) **uniquement dans les cases bleu** et de traduire **son jugement avec l'échelle de Saaty**. Si l'élément en ligne est plus important que celui en colonne, alors il convient d'utiliser les valeurs numériques (X) selon l'échelle de Saaty, sinon il faut inverser la valeur souhaitée (1/X).

Exemple de questionnement : *Est-ce que le niveau « préparation en vue de la réutilisation » est plus important que le « recyclage » ? Et dans quelle proportion ?* Il s'agit d'appliquer ce même raisonnement pour chacun des éléments.

**Réponse** : Oui, « Préparation en vue de la réutilisation » **domine modérément (est un peu plus important que ou répond un peu mieux à la problématique que ou est mieux que)**, le « Recyclage ». Placer le chiffre **3** à l'intersection de la ligne et de la colonne.

HIERARCHIE DE GESTION DES DECHETS	PREPARATION EN VUE DE LA REUTILISATION	RECYCLAGE	VALORISATION MATIERE	VALORISATION ENERGETIQUE	ÉLIMINATION
Préparation en vue de la réutilisation	1,00	3 ←			
Recyclage	X	1,00			
Valorisation Matière	X	X	1,00		
Valorisation énergétique	X	X	X	1,00	
Élimination	X	X	X	X	1,00

Il faut appliquer la même démarche pour chacune des intersections ligne-colonne, représentées par des cases vertes dans le tableau ci-dessus. De plus, il est très important pour la qualité des travaux, de donner **les justifications de la pondération**. Ces justifications permettent de comprendre l'avis de l'expert et sa sensibilité.

**Exemple de justifications :**

*Il s'agit d'un ordre de priorité défini par la réglementation.*

## Questionnaire pour la construction des critères de la dimension territoriale

Pour chaque critère de la dimension, on rappelle son objectif, la question à laquelle il répond et l'échelle associée. L'échelle proposée par Saaty est disponible en *Annexe 1* de ce questionnaire. L'*Annexe 2* résume l'ensemble des critères de la dimension territoriale sous une structure hiérarchique (proposée par la méthodologie AHP).

### Critère 1 : Favoriser l'économie locale (entrée dans l'installation)

Choisir une installation de gestion de déchet permet de contribuer à son activité économique et donc au développement économique de son territoire. Cette activité économique se traduit par une contribution à l'emploi local, aux ressources financières des collectivités (via les taxes sur la valeur ajoutée des entreprises), à l'image du territoire et pose ainsi les bases du développement futur. L'échelle détaillant les différents niveaux de ce critère permet de répondre à la question suivante : *À quelle maille territoriale, l'économie est-elle favorisée par le choix de cette installation ?*

Nous souhaitons évaluer au travers de ce critère, la capacité de l'installation choisie à participer au développement local du territoire. Nous proposons de construire l'échelle de ce critère sur la base des échelons administratifs français. Bien que les régions aient à présent les compétences sur la planification de gestion des déchets, nous avons choisi d'utiliser un découpage administratif plus fin. Nous considérons en effet que plus l'installation est éloignée du lieu de production du déchet, moins elle contribue au développement économique du territoire où se trouve le gestionnaire du déchet.

NIVEAU DE L'ECHELLE	LOCAL <sup>63</sup>	DEPARTEMENT	REGION	FRANCE	HORS FRANCE
Note des éléments de l'échelle	A	B	C	D	E

Le travail de l'expert consiste à établir les pondérations de chacun des éléments de l'échelle ci-dessus.

Exemple de questionnement : *Est-ce que le niveau « DÉPARTEMENT » est plus important, mieux que l'élément « RÉGION » pour favoriser l'économie locale du gestionnaire de déchet ? Et dans quelle proportion ?* Il s'agit d'appliquer ce même raisonnement pour chacun des éléments en ligne avec celui en colonne (case verte). Nous vous proposons d'indiquer vos préférences dans le tableau suivant :

	LOCAL	DEPARTEMENT	REGION	FRANCE	HORS FRANCE
Local	1				
Département		1			
Région			1		
France				1	
Hors France					1

### Justifications :

### Critère 2 : L'utilisation locale de la ressource (sortie de la filière)

Lorsqu'un déchet est valorisé, une nouvelle ressource, un produit est créé. Il s'agit pour les niveaux « recyclage » et « valorisation matière » de la hiérarchie de gestion des déchets, de matières premières de recyclage (MPR) et de matières premières secondaires (MPS). Ces dernières sont produites dans l'objectif de se substituer à des matières premières primaires (MPP) en quantité finie.

<sup>63</sup> Echelle communale, regroupement de communes.



Ce critère permet de mesurer le choix (indirect) du gestionnaire de déchet à participer au développement local du territoire via l'apport d'une ressource utile. En effet, si la ressource, nouvellement créée, est utilisée à un niveau administratif différent de son lieu de production alors, elle ne répond pas à un besoin particulier du territoire. Le résultat est une conséquence du choix de l'installation fait par le gestionnaire au critère 1.

L'objectif recherché, par le biais de ce critère, est d'évaluer l'utilité de la ressource au territoire. Pour cela, on regarde la proximité entre le lieu de production de la nouvelle ressource, issue de la valorisation du déchet, et son lieu d'utilisation. L'échelle détaillant les différents niveaux de ce critère permet de répondre à la question suivante : *À quelle maille territoriale, la ressource permet-elle de répondre à un besoin ?*

Nous avons choisi, pour une question d'homogénéité, d'utiliser la même échelle que le critère précédent :

NIVEAU DE L'ECHELLE	LOCAL	DEPARTEMENT	REGION	FRANCE	HORS FRANCE
Note des éléments de l'échelle	A	B	C	D	E

Le travail de l'expert consiste à établir les pondérations de chacun des éléments de l'échelle ci-dessus.

Exemple de questionnement : *Est-ce qu'une utilisation de la ressource au niveau du « DÉPARTEMENT » est plus important, mieux qu'une utilisation de la ressource au niveau du la « RÉGION » ? Et, dans quelle mesure ?* Il s'agit d'appliquer ce même raisonnement pour chacun des éléments en ligne avec celui en colonne (case bleu). Nous vous proposons d'indiquer vos préférences dans le tableau suivant :

	LOCAL	DEPARTEMENT	REGION	FRANCE	HORS FRANCE
Local	1				
Département		1			
Région			1		
France				1	
Hors France					1

**Justifications :**

### Critère 3 : La capacité à transporter le déchet sur le territoire

Les installations de gestion de déchet sont implantées partout en France et Europe (cadre de l'étude). Il s'agit alors de transporter le déchet d'un territoire à un autre. Dans la littérature la notion de transport, qu'elle soit de marchandises ou de personnes, dessine la dynamique interne du territoire et sa capacité à interagir avec les autres. Le transport des déchets se fait majoritairement par transport routier. Néanmoins, plusieurs collectivités et territoires s'intéressent à des alternatives et aux transports multimodaux.

Nous cherchons, via ce critère, à comparer les installations par rapport à la capacité à transporter le déchet jusqu'à leur territoire ( . Pour cela, on utilise l'échelle départementale (assez fine pour distinguer les réseaux de transport tout en permettant d'avoir les données nécessaires).

Le critère est composé de 2 sous-critères :

- (1) la surface des réseaux de transport du département où se situe l'installation de valorisation (ou d'élimination).
- (2) l'importance de la diversité des moyens de transport (routier, fluvial et ferroviaire) transport de la région où se situe l'installation de valorisation (ou d'élimination).

Nous avons choisi d'étudier uniquement le territoire final (département pour le première sous-critère et régional pour le second). En effet, le territoire du gestionnaire de déchet est le même, quel que soit l'installation choisie et nous considérons que l'itinéraire emprunté entre le territoire de départ et d'arrivée est optimisé (utilisation de grands axes) donc équivalent quel que soit l'installation choisie.

#### Importance du réseau de transport du territoire

Ce sous-critère permet d'évaluer le taux de développement des infrastructures de transport présentes sur le département où l'installation de gestion des déchets est implantée. Il permet de répondre à la question suivante : *Quelle est la capacité du territoire à transporter le déchet ?*

On calcule le ratio entre la surface occupée par les réseaux de transport et la surface totale du département où l'installation de gestion des déchets est implantée. On évalue ainsi le maillage du réseau du département final. On considère qu'un maillage important facilite l'accès à l'installation.

Les données utilisées sont obtenues à partir de l'indicateur OC30 — *Occupation du territoire (source Corine Land Cover, 2006 révisé et 2012, nouvelles séries)* via la Base de données régionale et départementale sur l'environnement, l'énergie, le transport, le logement et la construction.

Remarque : *Nous avons jugé que les résultats issus de ce critère sont linéaires et qu'il ne nécessite pas l'avis d'experts pour la construction.*

#### Importance de la diversité des moyens de transport du territoire

Ce sous-critère permet de mesurer la diversité des modes de transport présents sur le département final (routier, ferroviaire et fluvial). Il s'agit, pour ce critère, de répondre à la question suivante : *Le territoire dispose-t-il d'une diversité des moyens de transport ?*

Pour construire ce critère, nous sommes partis du principe que le territoire idéal (avec la plus grande diversité) possède les 3 modes de transport répartis équitablement, soit 1/3 chacun.

MODE DE TRANSPORT :	ROUTIER	RAIL	FLUVIAL
Représentation sur le territoire en %	33,33	33,33	33,33

Le principe de construction du sous-critère est basé sur une comparaison des régions françaises par rapport à cet idéal. Les pourcentages des moyens de transport sont obtenus à l'aide des indicateurs de flux de marchandises TR10 — *Transport de marchandises*. Par exemple, dans une région où 80 % du transport de marchandises se fait par route, 0 % en fluvial et 20 % en ferroviaire, le territoire obtient la note de  $|80-33|+|0-33|+|20-33|= 47 +33 +13=93$ .

Un territoire possédant une diversité idéale obtient donc la note 0. Plus le territoire s'éloigne de l'idéal, plus son score est élevé. Ainsi, un territoire peut obtenir au maximum le score de 133, s'il n'a qu'un seul mode de transport, soit  $|100-33|+|0-33|+|0-33|= 67 +33 +33=133$ .

Remarque : *Nous avons jugé que les résultats issus de ce critère sont linéaires et qu'il ne nécessite pas l'avis d'experts pour la construction*

### Poids des 2 sous-critères

Dans cette partie, nous allons comparer les 2 sous-critères entre eux, avec la même méthodologie, afin les pondérer. Selon vous, les 2 sous-critères présentés ont-ils une importance égale (note de 1) ? L'un des deux est-il plus important à prendre en considération que le second pour aider le gestionnaire de déchet ? Si oui, lequel et dans quelle mesure ?

	IMPORTANCE DU RESEAU DE TRANSPORT DU/DES TERRITOIRE(S)	IMPORTANCE DE LA DIVERSITE DES MOYENS DE TRANSPORT DU/DES TERRITOIRE(S)
Importance du réseau de transport du/des territoire(s)	1	
Importance de la diversité des moyens de transport du/des territoire(s)		1

### Justifications :

### Critère 4 : L'Emploi

L'emploi est l'un des enjeux majeurs actuels pour les collectivités. Plébiscité par les élus locaux, l'emploi non délocalisable permet de garantir des effets économiques sur le territoire. Dans le secteur des déchets, l'emploi est considéré comme tel, non délocalisable. Néanmoins toutes les filières, et par extension, les installations, n'ont pas besoin de la même quantité de main d'œuvre pour traiter un même tonnage de déchet. Nous cherchons, au travers de ce critère, à répondre à la question suivante : *Quel est le nombre d'employés nécessaire pour traiter le déchet dans l'installation envisagée ?*

Compte tenu de la diversité des filières de gestion possible (et donc de la difficulté pour obtenir toutes les données), nous avons choisi de les classer selon la nomenclature suivante :

10 000 TONNES				
REEMPLOI ET REUTILISATION	RECYCLAGE ET/OU VALORISATION MATIERE	VALORISATION ENERGETIQUE		ÉLIMINATION
64 ETP <sup>64</sup>	18 ETP	7 ETP	3 à 4 ETP	1 ETP

Le critère permet de mesurer les emplois « directs » présents sur le site de gestion des déchets. Les emplois indirects et induits ne sont pas pris en compte.

Il s'agit de comparer les installations envisagées, via le nombre d'employés nécessaire pour gérer 1 tonne de déchet. Si l'effectif précis n'est pas disponible, nous utiliserons les données fournies par les sources identifiées au tableau ci-dessus. Nous proposons l'échelle ci-dessous pour la comparaison des installations :

10 000 TONNES				
NIVEAU DE L'ÉCHELLE	(64 ETP)	(18 ETP)	(7 A 3 ETP)	(1 ETP)
Note des éléments de l'échelle	A	B	C	D

Le travail de l'expert consiste à établir les pondérations de chacun des éléments de l'échelle d'évaluation.

<sup>64</sup> Équivalent temps plein.

**Remarque :** Dans le cas où une installation nécessite 23 ETP pour assurer son fonctionnement, nous nous servirons de courbe de tendance établis à partir des pondérations données par les avis d'experts.

**Exemple de questionnement :** Pour gérer 10 000 tonnes de déchets, est-ce mieux de les envoyer vers une installation employant « 64 ETP » ou vers une installation fonctionnant avec « 18 ETP » ? Et dans quelle proportion ? Il s'agit d'appliquer ce même raisonnement pour chacun des éléments en ligne avec celui en colonne (case verte). Nous vous proposons d'indiquer vos préférences dans le tableau suivant :

	(64 ETP)	(18 ETP)	(7 à 3 ETP)	(1 ETP)
(64 ETP)	1			
(18 ETP)		1		
(7 à 3 ETP)			1	
(1 ETP)				1

**Justifications :**

**Critère 5 : Les incitations locales (politique, économique, réglementaire)**

Nous cherchons, au travers de ce critère, à mesurer les incitations locales pour la gestion des déchets. Ces incitations, si elles existent, favorisent l'acceptation locale d'une filière de gestion de déchet ou peuvent donner lieu à des aides (techniques ou financements publics) pour des projets de gestion des déchets. De plus, elles permettent d'améliorer l'image du gestionnaire de déchets qui pratique une gestion locale et durable.

Il s'agit d'apporter une réponse à la question ci-dessous : *Existe-t-il des incitations locales pour favoriser une filière de gestion du déchet ?*

Pour y répondre, on propose de mesurer les incitations locales à l'aide de 3 sous-critères :

- La dynamique d'EIT sur le territoire, traduit par le nombre de démarches d'Écologie Industrielle et Territoriale (EIT) dans la région
- La sensibilité territoriale pour la valorisation des déchets, traduit par le nombre d'initiatives Zéro Gaspillage Zéro déchet (ZGZD) dans la région.
- L'ambition territoriale pour la gestion des déchets.

**La dynamique d'Économie Industrielle et Territoriale (EIT) sur le territoire**

L'Écologie industrielle et territoriale est l'un des 7 piliers de l'économie circulaire. Nous cherchons à évaluer la proactivité du territoire (collectivités et acteurs économiques) pour une gestion des déchets locale et dans un contexte d'économie circulaire. Le nombre de démarches est mesuré à l'échelle départementale. Les données sont obtenues à partir d'un recensement établi par EDF en 2016.

NIVEAU DE L'ÉCHELLE	≥ 40	≥30	≥20	≥ 10
Note des éléments de l'échelle	A	B	C	D

Le travail de l'expert consiste à établir les pondérations de chacun des éléments de l'échelle ci-dessus.

**Exemple de questionnement :** *Est-ce qu'envoyer un déchet vers une installation implantée sur un territoire où, « plus de 40 » démarches d'EIT sont identifiées est mieux qu'une installation située sur un territoire disposant de « 30 », démarches identifiées ? Et dans quelle mesure ?*

Il s'agit d'appliquer ce même raisonnement pour chacun des éléments en ligne avec celui en colonne (case verte). Nous vous proposons d'indiquer vos préférences dans le tableau suivant :

NOMBRE DE DEMARCHES D'EIT	≥ 40	≥30	≥20	≥ 10
≥40	1,00			
≥30		1,00		
≥20			1,00	
≥10				1,00

**Justifications :****La sensibilité territoriale pour la valorisation des déchets**

Dans la même idée que le sous-critère précédent, il s'agit d'évaluer la proactivité des collectivités pour la gestion des déchets dans un contexte d'économie circulaire. Les appels à projets « territoires zéro déchet, zéro gaspillage », lancés par le ministère de l'Environnement et portés par l'ADEME, ont permis de repérer et d'accompagner les collectivités territoriales qui s'engagent dans une démarche ambitieuse de prévention, de réutilisation et de recyclage de leurs déchets, en particulier des déchets ménagers. Ces territoires déclinent ainsi de manière opérationnelle les avancées de la Loi de Transition Énergétique pour la Croissance Verte (LTECV) en matière d'économie circulaire. 153 territoires ont été désignés lauréats lors de deux appels à projets successifs (58 territoires fin 2014, et 95 territoires fin 2015). Nous proposons la construction suivante pour l'échelle du critère :

ÉLÉMENTS DE L'ÉCHELLE	≥ 7	≥5	≥3	1	0
Note des éléments de l'échelle	A	B	C	D	E

Le travail de l'expert consiste à établir les pondérations de chacun des éléments de l'échelle ci-dessus.

**Exemple de questionnaire :** *Est-ce qu'envoyer un déchet vers une installation présente sur un territoire où « plus de 7 » démarches sont identifiées est mieux qu'une installation située sur un territoire disposant de « 5 » démarches identifiées ? Et dans quelle mesure ?*

Il s'agit d'appliquer ce même raisonnement pour chacun des éléments en ligne avec celui en colonne (case bleu). Nous vous proposons d'indiquer vos préférences dans le tableau suivant :

NOMBRE D'INITIATIVES ZGZD PRESENTE DANS LA REGION	≥ 7	≥5	≥3	1	0
>7	1,00				
5		1,00			
3			1,00		
1				1,00	
0					1,00

**Justifications :****L'ambition territoriale pour la gestion des déchets**

Dans le cadre de la loi NOTRe, les Conseils Régionaux portent la responsabilité de la planification territoriale de la prévention et de la gestion des déchets. Ils doivent décliner les objectifs nationaux et européens à une échelle régionale. Pour ce critère, il s'agira de regarder si le plan régional de gestion des déchets opte pour des

objectifs plus ambitieux ou similaires à ceux proposés par la France. Nous proposons la construction d'échelle suivante :

ÉLÉMENTS DE L'ÉCHELLE	OUI, OBJECTIFS PLUS AMBITIEUX	NON, OBJECTIFS SIMILAIRES
Note des éléments de l'échelle	A	B

Le travail de l'expert consiste à établir les pondérations des 2 éléments de l'échelle ci-dessus.

**Question :** *Dans quelle mesure est-il mieux pour un gestionnaire de diriger son déchet vers un territoire qui a des objectifs plus ambitieux que ceux définis dans la réglementation française et européenne ?*

Les objectifs des plans régionaux sont supérieurs à ceux du plan national	Oui	Non
Oui	1	
Non		1

**Justifications :**

**Poids des 3 sous-critères composants les incitations locales.**

De la même manière que, pour le critère 3, nous allons dans cette partie comparer les 3 sous-critères deux à deux, avec la même méthodologie. *Selon vous, quelle est l'importance de chaque critère par rapport aux autres ? Ont-ils tous les 3 le même poids (si oui : note de 1 sur l'échelle de Saaty) ?*

	LA DYNAMIQUE D'EIT SUR LE TERRITOIRE	LA SENSIBILITE TERRITORIALE POUR LA VALORISATION DES DECHETS	L'AMBITION TERRITORIALE POUR LA GESTION DES DECHETS
La dynamique d'EIT sur le territoire	1		
La sensibilité territoriale pour la valorisation des déchets		1	
L'ambition territoriale pour la gestion des déchets			1

**Justifications :**

**Questionnaire pour l'obtention des poids des critères**

Cette étape va permettre de définir l'importance des critères, les uns par rapport aux autres et ainsi obtenir **le poids** de chacun d'entre eux. Celui-ci sert à l'agrégation multicritères et permet d'obtenir un score <sup>65</sup> évaluant la dimension territoriale.

<sup>65</sup> Le score est calculé en multipliant le poids du critère avec la note que l'installation a obtenue sur l'échelle de ce même critère. Le score final, évaluant la dimension réglementaire, est calculé à partir de la somme des scores obtenus par l'installation sur chacun des critères de cette dimension.

CRITERES DE LA DIMENSION TERRITORIALE	POIDS
Favoriser l'économie locale [entrée dans la filière]	A
Utilisation locale de la ressource [sortie de la filière]	B
Capacité à transporter le déchet sur le territoire	C
Emploi	D
Incitations locales [politique, économique, réglementaire]	E

Le travail de l'expert consiste à établir les poids (A, B, C, D, et E) des critères de la dimension territoriale.

Exemple de questionnement : *Est-ce que le critère « la pérennité de la filière » est plus important, mieux que le critère « la capacité d'absorption annuelle de l'installation » ? Et dans quelle proportion ?*

Nous vous proposons d'indiquer vos préférences dans le tableau ci-dessous :

	FAVORISER L'ECONOMIE LOCALE [ENTREE DANS LA FILIERE]	UTILISATION LOCALE DE LA RESSOURCE [SORTIE DE LA FILIERE]	CAPACITE A TRANSPORTER LE DECHET SUR LE TERRITOIRE	EMPLOI	INCITATIONS LOCALES [POLITIQUE, ECONOMIQUE, REGLEMENTAIRE]
Favoriser l'économie locale [entrée dans la filière]	1				
Utilisation locale de la ressource [sortie de la filière]		1			
Capacité à transporter le déchet sur le territoire			1		
Emploi				1	
Incitations locales [politique, économique, réglementaire]					1

**Justifications :**

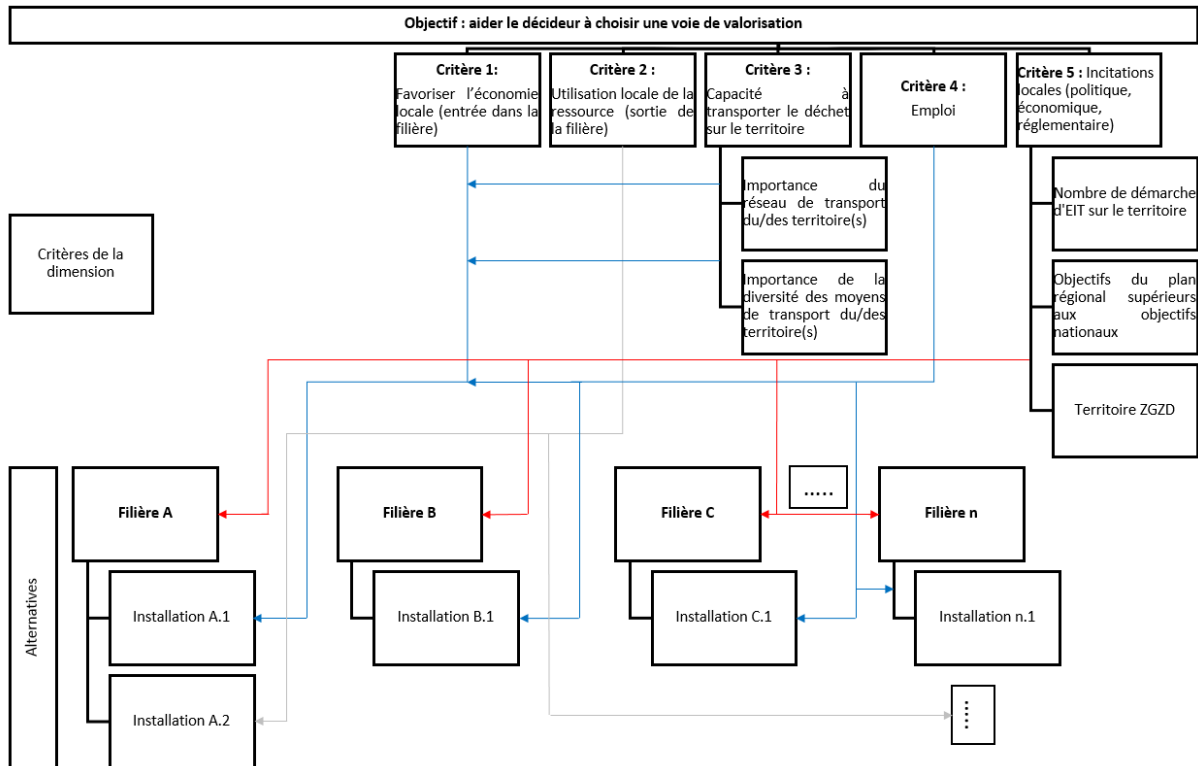


**Annexe 1 du questionnaire : Échelle proposée par Saaty :**

ÉCHELLES VERBALES	ÉCHELLES NUMÉRIQUES	COMMENTAIRES
Les deux éléments sont égaux	1	Deux éléments contribuent autant à la propriété
L'élément domine modérément l'autre	3	L'expérience et l'appréciation personnelles favorisent légèrement un élément par rapport à un autre
L'élément domine l'autre	5	L'expérience et l'appréciation personnelles favorisent fortement un élément par rapport à un autre
L'élément domine très fortement l'autre	7	Un élément est fortement favorisé et sa dominance est attestée dans la pratique
L'élément est absolument dominant	9	Les preuves favorisant un élément par rapport à un autre sont aussi convaincantes que possible

Les valeurs intermédiaires (2, 4, 6, 8) peuvent être utilisées pour affiner le jugement

**Annexe 2 du questionnaire : Structure AHP des critères de la dimension territoriale**



## Annexe 3.8 : Questionnaire de la dimension technique

### Présentation de la thèse

Dans les années 1980, la gestion des déchets qui se limitait à leur l'élimination dans la grande majorité des situations, devient aujourd'hui une gestion complexe et multidimensionnelle. Les autorités poussent les producteurs de déchets à opter pour la valorisation dans un contexte d'économie circulaire et dans l'objectif de répondre à des enjeux globaux. Pour un déchet donné, il peut y avoir plusieurs filières de gestion et, in fine, plusieurs installations capables de le gérer. Pour faire un choix, le gestionnaire de déchets doit prendre en compte les dimensions économique, environnementale, réglementaire, technique et territoriale.

Pour chacune de ces 5 dimensions, l'objectif de la thèse est de comparer les installations de gestion de déchets, en recherchant les critères nécessaires à une évaluation pour chacune des dimensions et de les agréger afin d'apporter une aide à l'arbitrage. Une liste de critères a été définie pour chaque dimension.

### Objectif du questionnaire

L'objectif de ce document est de recueillir les avis d'experts pour qu'ils participent pleinement à la construction des critères et de proposer une pondération entre eux, permettant une agrégation en un score unique pour **la dimension réglementaire**.

Pour construire les critères et pour l'agrégation multicritères, le travail bibliographique nous a conduits à retenir la méthode **Analytic Hierarchy Process (AHP)**. Cette méthode offre plusieurs avantages, notamment d'agréger des critères qualitatifs ou quantitatifs, mais aussi, d'avoir une flexibilité permettant en cas de modification, de ne pas remettre en cause la structure hiérarchique générale.

Pour chaque critère de la dimension, on rappelle son objectif, la question à laquelle il répond et l'échelle associée. L'échelle proposée par Saaty est disponible en *Annexe 1* de ce document. L'*Annexe 2* résume l'ensemble des critères de la dimension technique sous une structure hiérarchique (proposée par la méthodologie AHP).

### Exemple d'utilisation de la méthode AHP

Cette partie permet d'illustrer à travers un exemple le fonctionnement de la méthode AHP. On présente la méthode sur un critère d'une autre dimension.

#### **Critère : FAVORISER L'ÉCONOMIE LOCALE (entrée dans l'installation)**

Choisir une installation de gestion de déchet permet de contribuer à son activité économique, et donc à participer au développement économique de son territoire. En effet, cette action favorise le développement et instaure une dynamique locale. Celle-ci accroît les ressources financières des collectivités locales et permet la mise en place d'actions dans des domaines qui touchent directement la population (habitat, culture, loisirs, etc.). Cette dynamique peut permettre d'élargir les possibilités d'emploi des habitants, dynamiser l'image du territoire et poser ainsi les bases du développement futur.

L'échelle détaillant les différents niveaux de ce critère permet de répondre à la question suivante :

*À quelle maille territoriale, l'économie est-elle favorisée par le choix de cette installation ?*

Nous souhaitons évaluer au travers de ce critère, la capacité de l'installation choisie à participer au développement local du territoire. Bien que les régions aient à présent les compétences sur la planification de gestion des déchets, nous avons choisi d'utiliser un découpage administratif plus fin.

Il est demandé aux experts d'évaluer le poids relatif de chacun des éléments du tableau suivant en utilisant l'échelle de préférence :

NIVEAU DE L'ÉCHELLE	LOCAL <sup>66</sup>	DEPARTEMENT	REGION	FRANCE	HORS FRANCE
	A	B	C	D	E

ÉCHELLES VERBALES	ÉCHELLES NUMERIQUES	COMMENTAIRES
Les deux éléments sont égaux	1	Deux éléments contribuent autant à la propriété
L'élément domine modérément l'autre	3	L'expérience et l'appréciation personnelles favorisent légèrement un élément par rapport à un autre
L'élément domine l'autre	5	L'expérience et l'appréciation personnelles favorisent fortement un élément par rapport à un autre
L'élément domine très fortement l'autre	7	Un élément est fortement favorisé et sa dominance est attestée dans la pratique
L'élément est absolument dominant	9	Les preuves favorisant un élément par rapport à un autre sont aussi convaincantes que possible
Les valeurs intermédiaires (2, 4, 6, 8) peuvent être utilisées pour affiner le jugement		

Il s'agit de comparer chacun des éléments de l'échelle (du critère) deux à deux (l'élément en ligne par rapport à l'élément en colonne) **uniquement dans les cases bleu** et de traduire **son jugement avec l'échelle de Saaty**. Si l'élément en ligne est plus important que celui en colonne, alors il convient d'utiliser les valeurs numériques (X) selon l'échelle de Saaty, sinon il faut inverser la valeur souhaitée (1/X).

**Exemple de questionnement :** Est-ce que gérer localement (commune, communauté de commune) le déchet va permettre de favoriser l'économie par rapport à une gestion au niveau du département ?

**Réponse :** Oui, le niveau « local » **domine modérément (est un peu plus important que ou répond un peu mieux à la problématique que ou est mieux que)**, le niveau « département ». Placer le chiffre **3** à l'intersection de la ligne et de la colonne.

FAVORISER L'ÉCONOMIE LOCALE	LOCAL	DEPARTEMENT	REGION	FRANCE	HORS FRANCE
Local	1,00	3	3	5	9
Département	X	1,00			
Région	X	X	1,00		
France	X	X	X	1,00	
Hors France	X	X	X	X	1,00

<sup>66</sup> Échelle communale, regroupement de communes.

Il faut appliquer la même démarche pour chacune des intersections ligne-colonne, représentées par des cases vertes dans le tableau ci-dessus. Il est très important pour la qualité des travaux, de donner **les justifications de la pondération. Ces justifications permettent de comprendre l'avis de l'expert et sa sensibilité.**

**Exemple de justifications :** « En ce qui concerne l'économie, il existe une grande différence entre une installation présente sur le territoire français et une autre située hors de France. Ce sont 2 économies distinctes ».

### Questionnaire pour la construction des critères de la dimension technique

Pour chaque critère de la dimension, on rappelle son objectif, la question à laquelle il répond et l'échelle associée. L'échelle proposée par Saaty est disponible en *annexe 1* de ce document. L'*annexe 2* résume l'ensemble des critères de la dimension technique sous une structure hiérarchique (proposée par la méthodologie AHP).

#### Critère 1 : La pérennité de l'installation

Pour sortir du statut de déchet (SDD), ce dernier doit répondre à plusieurs conditions définies par l'article 6 de la directive-cadre 2008/98 relative aux déchets, dont la suivante : « *La substance ou l'objet* », à savoir *le déchet, soit « couramment utilisé à des fins spécifiques »*

Nous avons choisi de construire un critère, à partir de ce raisonnement ; c'est-à-dire, d'évaluer les installations sur une échelle de pérennité dans le temps. Nous supposons que l'installation choisie, qu'elle permette ou non une SDD, est mieux si elle est couramment utilisée pour traiter le déchet. Cette notion rassure le gestionnaire de déchet. Le mot « couramment » a été traduit par une échelle temporelle.

L'échelle détaillant les différents niveaux de ce critère permet de répondre à la question ci-dessous : *Depuis combien de temps l'installation permet-elle de valoriser (ou d'éliminer) le déchet ?*

Pour évaluer l'installation envisagée, nous proposons de mesurer cette pérennité à 10, 5, 3 et 1 an(s). Les niveaux 5, 3 et 1 an(s), de l'échelle, sont issus de l'INSEE et correspondent aux taux de survie des entreprises à 5, 3 et 1 an(s). Dans le secteur des déchets, certaines installations sont établies depuis plusieurs années, nous proposons donc d'ajouter, via l'avis d'expert, un niveau à 10 ans.

NIVEAU DE L'ECHELLE	≥ 10 ANS	≥ 5 ANS	≥ 3 ANS	≤ 1 AN
Note des éléments de l'échelle	A	B	C	D

Le travail de l'expert consiste à établir les pondérations de chacun des éléments de l'échelle ci-dessus.

Exemple de questionnement : *Est-ce que le niveau « ≥ 10 ANS » est plus important, mieux que le niveau « ≥ 5 ANS » ? Et dans quelle mesure ?*

Il s'agit d'appliquer ce même raisonnement pour chacun des éléments en ligne avec celui en colonne, et se poser la question suivante : quelle est l'importance **de l'élément en ligne par rapport à celui en colonne** ?

Nous vous proposons d'indiquer vos préférences dans le tableau suivant :

	≥ 10 ANS	≥ 5 ANS	≥ 3 ANS	≥ 1 AN
≥ 10 ans	1			
≥ 5 ans		1		
≥ 3 ans			1	
≤ 1 an				1

**Justifications :****Critère 2 : L'adéquation du déchet en entrée d'installation (Encadrement)**

Pour qu'un déchet puisse être dirigé vers une voie de valorisation, il doit exister une adéquation entre les caractéristiques techniques requises en entrée de l'installation et celles du flux de déchet. Ces prescriptions techniques, autrement dit le cahier des charges, sont établies à partir de guides, de normes ou par la réglementation. Nous proposons de contrôler l'existence (ou non) de cet encadrement (normes, guides) et de vérifier si ces derniers sont suffisamment étayés et reconnus. L'échelle détaillant les deux niveaux de ce critère permet de répondre à la question ci-dessous : *Le déchet produit répond-il à des spécifications d'entrée dans l'installation ?*

C'est un critère qualitatif où deux éléments de réponses sont proposés : « oui » et « non » :

ELEMENTS DE L'ECHELLE	OUI	NON
note des éléments de l'échelle	A	B

Le travail de l'expert consiste à établir les pondérations de chacun des éléments de l'échelle ;

**Question :** *Est-ce que l'élément « Oui (pour il existe un encadrement) » est plus important, mieux que l'élément « Non » ? Et dans quelle proportion ?*

Nous vous proposons d'indiquer votre préférence dans le tableau suivant :

L'INSTALLATION CHOISIE DISPOSE-T-ELLE D'UN OU PLUSIEURS ENCADREMENTS ?	OUI	NON
Oui	1	
Non		1

**Justifications :****Critère 3 : L'adéquation du produit dans une filière (encadrement)**

Lorsqu'un déchet a été valorisé, une nouvelle ressource, un produit est créé. Ce dernier dispose alors de ses propres caractéristiques intrinsèques. La nouvelle ressource doit respecter la législation et les normes applicables aux produits ou répondre à un cahier des charges pour être utilisée convenablement.

Nous proposons de contrôler l'existence (ou non) de l'ensemble de cet encadrement (normes, guides) et de vérifier si ces derniers sont suffisamment étayés et reconnus. L'échelle détaillant les différents niveaux de ce critère permet de répondre à la question ci-dessous : *La substance ou l'objet produit répond-il à des spécifications précises ?*

Ce questionnaire permet de connaître si la ressource créée (issu de la transformation du déchet) en sortie d'installation peut être utilisée à une fin utile. Nous avons construit ce critère à partir de l'article 6 de la directive-cadre 2008/98 relative à la sortie du statut de déchets (SDD). Lorsqu'un déchet a subi une opération de valorisation ou de recyclage, il doit répondre, en autres, à la condition suivante :

- « La substance ou l'objet remplit des exigences techniques aux fins spécifiques et respecte la législation et des normes applicables aux produits ».

Nous proposons de construire ce critère sur une échelle qualitative, avec les éléments suivants : « oui » et « non » :

ELEMENTS DE L'ECHELLE	OUI	NON
Note de l'échelle	A	B

Le travail de l'expert consiste à établir les pondérations des deux éléments de l'échelle

Question : *Est-ce que l'élément « Oui (il existe un encadrement) » est plus important, mieux que l'élément « Non » ? Et dans quelle proportion ?*

Nous vous proposons d'indiquer votre préférence dans le tableau suivant :

L'INSTALLATION DE SORTIE DISPOSE-T-ELLE D'UN OU PLUSIEURS ENCADREMENTS ?	OUI	NON
Oui	1	
Non	<del>1</del>	1

**Justifications :**

#### Critère 4 : La multiplicité d'utilisation du produit

Lorsqu'un déchet est valorisé, une nouvelle ressource, un produit est créé. Il s'agit pour les niveaux « recyclage » et « valorisation matière » de la hiérarchie de gestion des déchets, de matières premières de recyclage (MPR) et de matières premières secondaires (MPS). Ces dernières sont produites dans l'objectif de se substituer à des matières premières primaires (MPP) en quantité finie. Elles disposent alors de leurs propres caractéristiques intrinsèques qui, dans certains cas, leurs permettent d'être utilisées à plusieurs fins.

Nous cherchons, à l'aide de ce critère, à mesurer le nombre de possibilités d'utilisation du produit (issu du déchet) en sortie d'installation. En effet, on considère qu'une installation de valorisation est d'autant plus intéressante que la ressource créée a plusieurs débouchés d'utilisation. L'échelle détaillant les différents niveaux de ce critère permet de répondre à la question ci-dessous : *Quel est le nombre de possibilités d'utilisation de la nouvelle ressource à ce jour ?*

Pour y répondre, nous proposons la construction suivante :

NIVEAU DE L'ECHELLE	≥10 POSSIBILITES	≥3 POSSIBILITES	1 OU 2 POSSIBILITE(S)
note des éléments de l'échelle	A	B	C

Le travail de l'expert consiste à établir les pondérations de chacun des éléments de l'échelle ci-dessus.

Exemple de questionnement : *Est-ce que le niveau « ≥10 POSSIBILITÉS » est plus important, mieux que le niveau « 1 OU 2 POSSIBILITÉ(S) » ? Et dans quelle proportion ?* Nous vous proposons d'indiquer vos préférences dans le tableau suivant :

LE NOMBRE DE POSSIBILITES D'UTILISATION	≥10	≥3	1 OU 2
≥10	1		
≥3	<del>1</del>	1	
1 ou 2	<del>1</del>	<del>1</del>	1

**Justifications :**

**Critère 5 : La capacité d'absorption annuelle de l'installation**

Les installations de gestion des déchets disposent de leurs propres caractéristiques. L'une d'entre elles est la capacité de traitement annuelle. Celle-ci est définie par les caractéristiques techniques de l'installation, via ses équipements, mais aussi par son arrêté préfectoral d'exploitation. Nous cherchons à partir de ce critère à évaluer la capacité de l'installation envisagée à prendre en charge la quantité de déchet produite. L'échelle détaillant les différents niveaux de ce critère permet de répondre à la question ci-dessous : *La capacité de traitement annuelle de l'installation permet-elle de répondre au besoin du gestionnaire de déchets ?*

NIVEAU DE L'ÉCHELLE	≥ 200 %	100 %	< 100 %	≤ 50 %
Note des éléments de l'échelle	A	B	C	D

Le niveau « ≥ 200 % » représente une installation capable de prendre en charge le double du tonnage absorbé annuellement. Les niveaux « < 100 % » et « ≤ 50 % » représentent des installations ne pouvant accepter qu'une partie du tonnage annuel, et impliquent que le gestionnaire de déchet doit obligatoirement trouver une installation complémentaire (< 100 %), voire plusieurs (≤ 50 %).

Le travail de l'expert consiste à établir les pondérations de chacun des éléments de l'échelle ci-dessus.

Exemple de questionnement : *Est-ce que diriger un déchet vers une installation capable de prendre en le double, soit « 200 % » de plus que le tonnage négocié annuellement est mieux qu'une installation ne pouvant pas prendre entièrement le déchet « < 100 % » ? Et dans quelle proportion ?*

Nous vous proposons d'indiquer vos préférences dans le tableau suivant :

% DU TONNAGE POUVANT ETRE ACCEPTE	≥ 200 %	100 %	< 100 %	≤ 50 %
≥ 200 %	1			
100 %		1		
< 100 %			1	
≤ 50 %				1

**Justifications :**

**Critère 6 : La flexibilité d'absorption de l'installation**

L'une des caractéristiques des installations de gestion des déchets est sa capacité à accepter des fluctuations quantitatives de déchets. Nous cherchons à partir de ce critère à évaluer la capacité de l'installation envisagée à prendre en charge des fluctuations temporelles du volume de déchets. On a défini une fluctuation temporaire comme une quantité supplémentaire de déchets produits (en tonne) de 20 %, répartie sur 2 semaines tous les 2 mois.

Nous souhaitons répondre, via ce critère, à la question suivante : *Est-ce que l'installation de gestion de déchet peut supporter une flexibilité quantitative ?*

Nous proposons de construire ce critère sur l'échelle, qualitative : « oui » ou « non », ci-dessous :

ELEMENTS DE L'ECHELLE	OUI	NON
note de l'échelle	A	B



Le travail de l'expert consiste à établir les pondérations de chacun des éléments de l'échelle ci-dessus.

Question : *Est-ce que l'élément « Oui, l'installation peut supporter une quantité supplémentaire de 20 % sur 2 semaines tous les 2 mois) » est plus important, mieux que l'élément « Non, l'installation ne peut pas [...] tous les 2 mois) » ? Et dans quelle proportion ?*

Nous vous proposons d'indiquer votre préférence dans le tableau suivant :

L'INSTALLATION PEUT-ELLE SUPPORTER UNE QUANTITE SUPPLEMENTAIRE DE 20 % SUR 2 SEMAINES TOUS LES 2 MOIS ?	OUI	NON
Oui	1	
Non		1

**Justifications :**

### Questionnaire pour l'obtention des poids des critères de la dimension Technique

Cette étape va permettre de définir l'importance des critères, les uns par rapport aux autres et ainsi obtenir le **poids** de chacun d'entre eux. Celui-ci sert à l'agrégation multicritères et permet d'obtenir un score<sup>67</sup> évaluant la dimension technique.

CRITERES DE LA DIMENSION TECHNIQUE	POIDS
La pérennité de la filière	A
L'adéquation du produit dans une filière (encadrement)	B
L'adéquation du produit dans une filière (encadrement)	C
La multiplicité des produits	D
La capacité d'absorption annuelle de l'installation	E
La flexibilité d'absorption de l'installation	F

Le travail de l'expert consiste à établir les poids (A, B, C, D, E et F) des critères de la dimension technique.

Exemple de questionnement : *Est-ce que le critère « la pérennité de la filière » est plus important, mieux que le critère « la capacité d'absorption annuelle de l'installation » ? Et dans quelle proportion ?*

Nous vous proposons d'indiquer vos préférences dans le tableau ci-dessous :

<sup>67</sup> Le score est calculé en multipliant le poids du critère avec la note que l'installation a obtenue sur l'échelle de ce même critère. Le score final, évaluant la dimension réglementaire, est calculé à partir de la somme des scores obtenus par l'installation sur chacun des critères de cette dimension.

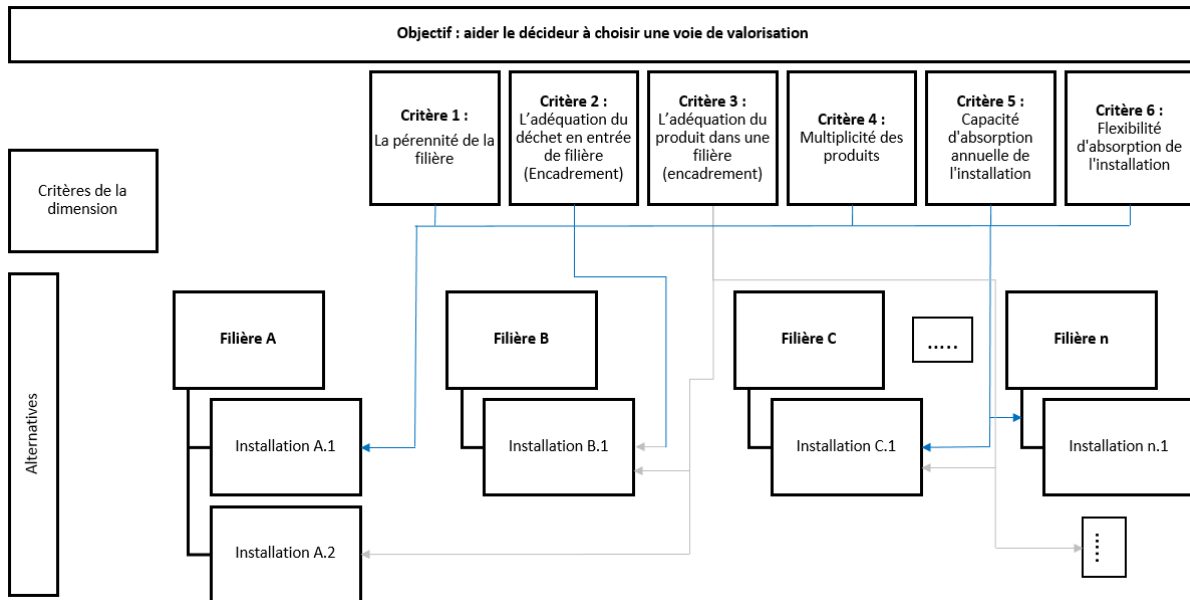
	<b>LA PERENNITE DE LA FILIERE</b>	<b>L'ADEQUATION DU DECHET EN ENTREE DE FILIERE (ENCADREMENT)</b>	<b>L'ADEQUATION DU PRODUIT DANS UNE FILIERE (ENCADREMENT)</b>	<b>MULTIPLICITE DES PRODUITS</b>	<b>CAPACITE D'ABSORPTION ANNUELLE DE L'INSTALLATION</b>	<b>FLEXIBILITE D'ABSORPTION DE L'INSTALLATION</b>
La pérennité de la filière	1					
L'adéquation du déchet en entrée de filière (Encadrement)		1				
L'adéquation du produit dans une filière (encadrement)			1			
Multiplicité des produits				1		
Capacité d'absorption annuelle de l'installation					1	
Flexibilité d'absorption de l'installation						1

**Justifications :**

**Annexe 1 du questionnaire : Échelle proposée par Saaty :**

ÉCHELLES VERBALES	ÉCHELLES NUMÉRIQUES	COMMENTAIRES
Les deux éléments sont égaux	1	Deux éléments contribuent autant à la propriété
L'élément domine modérément l'autre	3	L'expérience et l'appréciation personnelles favorisent légèrement un élément par rapport à un autre
L'élément domine l'autre	5	L'expérience et l'appréciation personnelles favorisent fortement un élément par rapport à un autre
L'élément domine très fortement l'autre	7	Un élément est fortement favorisé et sa dominance est attestée dans la pratique
L'élément est absolument dominant	9	Les preuves favorisant un élément par rapport à un autre sont aussi convaincantes que possible
Les valeurs intermédiaires (2, 4, 6, 8) peuvent être utilisées pour affiner le jugement		

**Annexe 2 du questionnaire : Structure AHP des critères de la dimension technique**



## **Annexe 3.9 : Questionnaire de la dimension environnementale**

### **Présentation de la thèse**

Dans les années 1980, la gestion des déchets qui se limitait à leur l'élimination dans la grande majorité des situations, devient aujourd'hui une gestion complexe et multidimensionnelle. Les autorités poussent les producteurs de déchets à opter pour la valorisation dans un contexte d'économie circulaire et dans l'objectif de répondre à des enjeux globaux. Pour un déchet donné, il peut y avoir plusieurs filières de gestion et, in fine, plusieurs installations capables de le gérer. Pour faire un choix, le gestionnaire de déchets doit prendre en compte les dimensions économique, environnementale, réglementaire, technique et territoriale.

Pour chacune de ces 5 dimensions, l'objectif de la thèse est de comparer les installations de gestion de déchets, en recherchant les critères nécessaires à une évaluation pour chacune des dimensions et de les agréger afin d'apporter une aide à l'arbitrage. Une liste de critères a été définie pour chaque dimension.

### **Objectif du questionnaire**

L'objectif de ce document est de recueillir les avis d'experts pour qu'ils participent pleinement à la construction des critères et de proposer une pondération entre eux, permettant une agrégation en un score unique pour **la dimension réglementaire**.

Pour construire les critères et pour l'agrégation multicritères, le travail bibliographique nous a conduits à retenir la méthode **Analytic Hierarchy Process (AHP)**. Cette méthode offre plusieurs avantages, notamment d'agréger des critères qualitatifs ou quantitatifs, mais aussi, d'avoir une flexibilité permettant en cas de modification, de ne pas remettre en cause la structure hiérarchique générale.

Pour chaque critère de la dimension, on rappelle son objectif, la question à laquelle il répond et l'échelle associée. L'échelle proposée par Saaty est disponible en *Annexe 1* de ce document. L'*Annexe 2* résume l'ensemble des critères de la dimension technique sous une structure hiérarchique (proposée par la méthodologie AHP).

### **Exemple d'utilisation de la méthode AHP**

Cette partie permet d'illustrer à travers un exemple le fonctionnement de la méthode AHP. On présente la méthode sur un critère d'une autre dimension.

#### **Critère : FAVORISER L'ÉCONOMIE LOCALE (entrée dans l'installation)**

Choisir une installation de gestion de déchet permet de contribuer à son activité économique et donc à de participer au développement économique de son territoire. En effet, cette action favorise le développement et instaure une dynamique locale. Celle-ci accroît les ressources financières des collectivités locales et permet la mise en place d'actions dans des domaines qui touchent directement la population (habitat, culture, loisirs, etc.). Cette dynamique peut permettre d'élargir les possibilités d'emploi des habitants, dynamiser l'image du territoire et poser ainsi les bases du développement futur.

L'échelle détaillant les différents niveaux de ce critère permet de répondre à la question suivante :

*À quelle maille territoriale, l'économie est-elle favorisée par le choix de cette installation ?*

Nous souhaitons évaluer au travers de ce critère, la capacité de l'installation choisie à participer au développement local du territoire. Bien que les régions aient à présent les compétences sur la planification de gestion des déchets, nous avons choisi d'utiliser un découpage administratif plus fin.

Il est demandé aux experts d'évaluer le poids relatif de chacun des éléments du tableau suivant en utilisant l'échelle de préférence :

NIVEAU DE L'ÉCHELLE	LOCAL <sup>68</sup>	DEPARTEMENT	REGION	FRANCE	HORS FRANCE
	A	B	C	D	E

ÉCHELLES VERBALES	ÉCHELLES NUMERIQUES	COMMENTAIRES
Les deux éléments sont égaux	1	Deux éléments contribuent autant à la propriété
L'élément domine modérément l'autre	3	L'expérience et l'appréciation personnelles favorisent légèrement un élément par rapport à un autre
L'élément domine l'autre	5	L'expérience et l'appréciation personnelles favorisent fortement un élément par rapport à un autre
L'élément domine très fortement l'autre	7	Un élément est fortement favorisé et sa dominance est attestée dans la pratique
L'élément est absolument dominant	9	Les preuves favorisant un élément par rapport à un autre sont aussi convaincantes que possible
Les valeurs intermédiaires (2, 4, 6, 8) peuvent être utilisées pour affiner le jugement		

Il s'agit de comparer chacun des éléments de l'échelle (du critère) deux à deux (l'élément en ligne par rapport à l'élément en colonne) **uniquement dans les cases bleu** et de traduire **son jugement avec l'échelle de Saaty**. Si l'élément en ligne est plus important que celui en colonne, alors il convient d'utiliser les valeurs numériques (X) selon l'échelle de Saaty, sinon il faut inverser la valeur souhaitée (1/X).

**Exemple de questionnement :** Est-ce que gérer localement (commune, communauté de commune) le déchet va permettre de favoriser l'économie par rapport à une gestion au niveau du département ?

**Réponse :** Oui, le niveau « local » **domine modérément (est un peu plus important que ou répond un peu mieux à la problématique que ou est mieux que)**, le niveau « département ». Placer le chiffre **3** à l'intersection de la ligne et de la colonne.

FAVORISER L'ÉCONOMIE LOCALE	LOCAL	DEPARTEMENT	REGION	FRANCE	HORS FRANCE
Local	1,00	3	3	5	9
Département	X	1,00			
Région	X	X	1,00		
France	X	X	X	1,00	
Hors France	X	X	X	X	1,00

<sup>68</sup> Échelle communale, regroupement de communes.

Il faut appliquer la même démarche pour chacune des intersections ligne-colonne, représentées par des cases vertes dans le tableau ci-dessus. Il est très important pour la qualité des travaux, de donner **les justifications de la pondération. Ces justifications permettent de comprendre l'avis de l'expert et sa sensibilité.**

**Exemple de justifications :** « En ce qui concerne l'économie, il existe une grande différence entre une installation présente sur le territoire français et une autre située hors de France. Ce sont 2 économies distinctes ».

### Questionnaire pour la construction des critères de la dimension environnementale

Pour chaque critère de la dimension, on rappelle son objectif, la question à laquelle il répond et l'échelle associée. L'échelle proposée par Saaty est disponible en *annexe 1* de ce document. L'*annexe 2* résume l'ensemble des critères de la dimension technique sous une structure hiérarchique (proposée par la méthodologie AHP).

#### Critère 1 : Les impacts environnementaux réglementés

Chaque installation de gestion des déchets est soumise à la réglementation ICPE<sup>69</sup>. L'ensemble de ces installations, qu'elles soient soumises à déclaration, enregistrement ou autorisation, doivent respecter les prescriptions qui leur sont applicables. Ces dernières sont établies par la réglementation nationale et précisées par des arrêtés préfectoraux. Ce critère permet de vérifier que l'envoi du déchet dans une installation n'aura pas d'effets négatifs sur l'environnement autres que ceux acceptés par la réglementation en vigueur. L'échelle détaillant les différents niveaux de ce critère permet de répondre à la question suivante : *L'utilisation du déchet dans l'installation aura-t-elle un effet négatif sur l'environnement ?* Pour l'évaluation, nous proposons la construction suivante :

NON, SANS IMPACT	REMIS EN CAUSE	OUI, IL Y A UN IMPACT
A	B	C

Afin d'établir la relation entre l'installation et l'échelle présentée ci-dessus, nous proposons de mesurer l'absence ou la présence d'impacts, via le nombre de mises en demeure ayant trait à l'environnement. En effet, lorsque des écarts sont constatés lors des contrôles menés par les inspecteurs des installations classées, l'installation est mise en demeure. C'est une demande formelle du préfet de mise en conformité de l'installation par rapport aux prescriptions imposées à l'exploitant de l'ICPE.

ÉCHELLE	NOMBRE DE MISE EN DEMEURE
Non, Sans Impact	0
Remis en cause	1
Oui, il y a un impact	≥ 2

Le travail de l'expert consiste à établir les pondérations de chacun des éléments de l'échelle du ci-dessus.

Exemple de questionnement : *Est-ce que le niveau « Sans impact » est plus important, mieux que le « Remis en cause » ? Et dans quelle proportion ? Nous vous proposons d'indiquer vos préférences dans le tableau suivant :*

	NON, SANS IMPACT	REMIS EN CAUSE	OUI, IL Y A UN IMPACT
Non, sans Impact	1		
Remis en cause		1	
Oui, il y a un impact			1

<sup>69</sup> Installation Classée pour la Protection de l'Environnement.

**Justifications :****Critère 2 : L'impact sur le changement climatique**

Le changement climatique est défini comme conséquence des émissions de GES dans l'atmosphère. On appelle « effet de serre » l'augmentation de la température moyenne de l'atmosphère induite par l'augmentation de la concentration atmosphérique moyenne de diverses substances. L'augmentation de l'effet de serre, conséquence notamment des activités humaines, provoque un changement climatique. L'indicateur d'impact sur le changement climatique (ACV) est majoritairement utilisé par rapport aux autres catégories d'impacts/Cette observation s'explique par le fait qu'il existe un consensus scientifique par rapport à sa méthodologie de construction. L'objectif du critère est de comparer les installations entre elles par rapport à leurs émissions de gaz à effet de serre (GES), sur la base de la méthodologie ACV. Il permet de répondre au questionnement suivant : *Quelle quantité de gaz à effet de serre (CO2 eq) est potentiellement émise par l'installation ?*

Ce critère est construit sur la base d'une échelle continue. En effet, les impacts GES dépendent à la fois de l'installation choisie, du transport (distance entre le lieu de production du déchet et son lieu de valorisation ou d'élimination), mais aussi du moyen de transport utilisé. La méthodologie proposée par Saaty permet de comparer des installations, mais à la condition de recueillir les avis d'experts pour chaque nouvelle étude. Or, nous cherchons à comparer les installations, sans leurs interventions à chaque étude. Nous avons donc fait le choix de comparer ces installations via la démarche suivante :

*Soit 2 installations A et B, avec un impact GES respectif  $Env_a$  et  $Env_b$  où  $Env_a < Env_b$ . Il s'agit de comparer les 2 installations à partir de leurs émissions via la formulation ci-dessous :*

$$\frac{(Env_a - Env_b)}{Env_a} * 100 = - X\%$$

*Le résultat montre que l'installation A émet X % de GES de moins que l'installation B.*

La méthode par ratio, présentée ci-dessus, permet de comparer les installations (premier objectif) sur une échelle « évolutive » en évitant une intervention, systématique, des experts pour chaque cas d'études. En effet, raisonner via un ratio permet d'éviter de multiplier les avis d'experts dans le cas de comparaison de chiffres de grandeurs très différentes. On demande, à l'expert de différencier des poids relatifs issus du ratio sans unité et d'établir la relation entre ce résultat de la comparaison (— 10 %, — 20 %, etc.) et l'échelle de Saaty.

**Exemple de questionnement :** *Est-ce qu'un résultat montrant que l'une des deux installations comparées émet « 30 % de moins » de GES que la seconde est un peu mieux, mieux, beaucoup mieux ou absolument mieux que la seconde ? Existe-t-il un seuil (représenté ici, par un pourcentage) à partir duquel, vous considérez qu'une installation est absolument mieux que la seconde ?*

RESULTAT DE LA COMPARAISON	- 10 %	- 20 %	- 30 %	- 40 %	- 50 %	- 60 %	- 70 %	- 80 %	- 90 %	≥ - 100%
Note de Saaty :										

**Justifications :**



### Critère 3 : L'économie de ressources vierges

Les activités humaines font peser un certain nombre de pressions sur l'environnement. Outre les émissions de gaz à effet de serre, la consommation de ressources et l'extraction de matières premières vierges posent également des problèmes environnementaux. L'utilisation des ressources excède largement la capacité d'assimilation et de renouvellement des écosystèmes. Le 21 octobre 1993, la société avait consommé plus de ressources que la Terre n'est capable d'en produire et de régénérer en 1 an. En 2015, ce jour était le 13 aout.

Lorsqu'un déchet est valorisé, une nouvelle ressource, un produit est créé. Il s'agit pour les niveaux « recyclage » et « valorisation matière » de la hiérarchie de gestion des déchets, de matières premières de recyclage (MPR) et de matières premières secondaires (MPS). Ces dernières sont produites dans l'objectif de se substituer à des matières premières primaires en quantité finie.

Il s'agit pour ce critère d'établir un bilan matière de l'installation de valorisation et d'en déduire la quantité évitée de matières premières vierges issue de la transformation du déchet.

L'échelle proposée ci-dessous permet de répondre à la question suivante : *La nouvelle ressource peut-elle se substituer aux matières premières vierges extraites ?*

% DE MATIERES PREMIERES VIERGES EVITEES	≥ 80 %	≥ 60 %	≥ 40 %	≥ 20 %
Notes	A	B	C	D

Il est certain que plus le pourcentage de matières premières vierges évitées est élevé plus l'installation est efficace, et donc mieux c'est.

Le travail de l'expert consiste à établir les pondérations de chacun des éléments de l'échelle ci-dessus.

Exemple de questionnement : *Est-ce que le niveau « ≥ 80 % » est plus important, mieux que le « ≥ 40 % » ? Et dans quelle proportion ?* Nous vous proposons d'indiquer vos préférences dans le tableau suivant :

% DE MATIERES PREMIERES VIERGES EVITEES	≥ 80 %	≥ 60 %	≥ 40 %	≥ 20 %
≥ 80 %	1			
≥ 60 %		1		
≥ 40 %			1	
≥ 20 %				1

**Justifications :**

### Critère 4 : La Consommation en eau

L'indicateur de consommation d'eau n'est pas à proprement parlé un indicateur d'impacts sur l'environnement, mais plutôt un indicateur de flux. Il est exprimé en m<sup>3</sup> et est calculé en sommant les flux d'eau consommée pendant le processus de valorisation (ou d'élimination). La consommation d'eau prend en compte les consommations directes liées au traitement de fin de vie (valorisation ou élimination). L'objectif de ce critère est de comparer les installations entre elles par rapport à leur consommation en eau. Il permet de répondre au questionnement suivant : *Quel est le volume d'eau utilisé (m3) par l'installation de gestion des déchets ?*

De la même manière que le critère « *Impact sur le changement climatique* », ce critère est construit sur la base d'une échelle continue. Nous proposons de construire ce critère de la même manière.

Soit 2 installations A et B, avec une consommation en eau  $Env_a$  et  $Env_b$  où  $Env_a < Env_b$ . Il s'agit de comparer les 2 installations à partir de leurs consommations via la formulation ci-dessous :

$$\frac{(Env_a - Env_b)}{Env_a} * 100 = - X\%$$

Le résultat montre que l'installation A consomme X % de moins que l'installation B.

On demande, à l'expert de différencier des poids relatifs issus du ratio sans unité et d'établir la relation entre ce résultat de la comparaison (- 10 %, - 20 %, etc.) et l'échelle de Saaty.

**Exemple de questionnement :** *Est-ce qu'un résultat montrant que l'une des deux installations comparées consomme « 30 % de moins » d'eau est un peu mieux, mieux, beaucoup mieux ou absolument mieux que la seconde ? Existe-t-il un seuil (représenté ici, par un pourcentage) à partir duquel, vous considérez qu'une installation est absolument mieux que la seconde ?*

RESULTAT DE LA COMPARAISON	- 10 %	- 20 %	- 30 %	- 40 %	- 50 %	- 60 %	- 70 %	- 80 %	- 90 %	≥ - 100%
Note de Saaty :										

**Justifications :**

**Critère 5 : La consommation d'énergie**

L'énergie primaire totale représente la somme de toutes les sources d'énergie qui sont directement puisées dans les réserves naturelles telles que le gaz, le pétrole, le charbon, le minerai d'uranium, la biomasse et l'énergie hydraulique. L'énergie primaire totale est divisée en énergie non renouvelable et énergie renouvelable. L'objectif de ce critère est de comparer les installations entre elles par rapport à leur consommation en énergie primaire non renouvelable. Il permet de répondre au questionnement suivant : *Quelle est la quantité d'énergie non renouvelable consommée par l'installation de gestion des déchets ?*

De la même manière que les critères précédents, l'échelle de ce critère est continue. Pour conserver la cohérence de la démarche, nous avons construit le critère sur le même principe.

Cette méthode permet d'examiner la consommation d'énergie non renouvelable comparativement aux autres solutions possibles.

Soit 2 installations A et B, avec une consommation d'énergie primaire non renouvelable  $Env_a$  et  $Env_b$  où  $Env_a < Env_b$ . Il s'agit de comparer les installations à partir de leurs consommations via la formulation ci-dessous :

$$\frac{(Env_a - Env_b)}{Env_a} * 100 = - X\%$$

*Le résultat montre que l'installation A consomme X % de moins que l'installation B.*

On demande, à l'expert de différencier des poids relatifs issus du ratio sans unité et d'établir la relation entre ce résultat de la comparaison (– 10 %, – 20 %, etc.) et l'échelle de Saaty.

Exemple de questionnement : *Est-ce qu'un résultat montrant que l'une des deux installations comparées consomme « 30 % de moins » d'énergie primaire non renouvelable est un peu mieux, mieux, beaucoup mieux ou absolument mieux que la seconde ? Existe-t-il un seuil (représenté ici, par un pourcentage) à partir duquel, vous considérez qu'une installation est absolument mieux que la seconde ?*

RESULTAT DE LA COMPARAISON	– 10 %	– 20 %	– 30 %	– 40 %	– 50 %	– 60 %	– 70 %	– 80 %	– 90 %	≥ – 100%
Note de Saaty :										

**Justifications :**

**Questionnaire pour l'obtention des poids des critères**

Cette étape va permettre de définir l'importance des critères, les uns par rapport aux autres et ainsi obtenir **le poids** de chacun d'entre eux. Celui-ci sert à l'agrégation multicritères et permet d'obtenir un score<sup>70</sup> évaluant la dimension environnementale.

CRITERES DE LA DIMENSION ECONOMIQUE	POIDS
L'absence d'impacts environnementaux	A
L'impact sur le changement climatique	B
L'économie de ressources vierges	C
La consommation en eau	D
La consommation en énergie	E

Le travail de l'expert permet d'obtenir les poids (A, B, C, D et E) des critères de la dimension économique, en utilisant la méthode AHP.

Exemple de questionnement : *Est-ce que le critère « L'impact sur le changement climatique » est plus important que le critère « L'économie de ressources vierges », et si oui, dans quelle proportion ?*

Nous vous proposons d'indiquer vos préférences dans le tableau ci-dessous :

CRITERES	L'ABSENCE D'IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX	L'IMPACT SUR LE CHANGEMENT CLIMATIQUE	L'IMPACT SUR L'EXTRACTION DE MATIERES PREMIERES	LA CONSOMMATION EN EAU	LA CONSOMMATION EN ENERGIE
L'absence d'impacts environnementaux	1				

<sup>70</sup> Le score est calculé en multipliant le poids du critère avec la note que l'installation a obtenue sur l'échelle de ce même critère. Le score final, évaluant la dimension réglementaire, est calculé à partir de la somme des scores obtenus par l'installation sur chacun des critères de cette dimension.

CRITERES	L'ABSENCE D'IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX	L'IMPACT SUR LE CHANGEMENT CLIMATIQUE	L'IMPACT SUR L'EXTRACTION DE MATIERES PREMIERES	LA CONSOMMATION EN EAU	LA CONSOMMATION EN ENERGIE
L'impact sur le changement climatique	X	1			
L'impact sur l'extraction de matières premières	X	X	1		
La consommation en eau	X	X	X	1	
La consommation en énergie	X	X	X	X	1

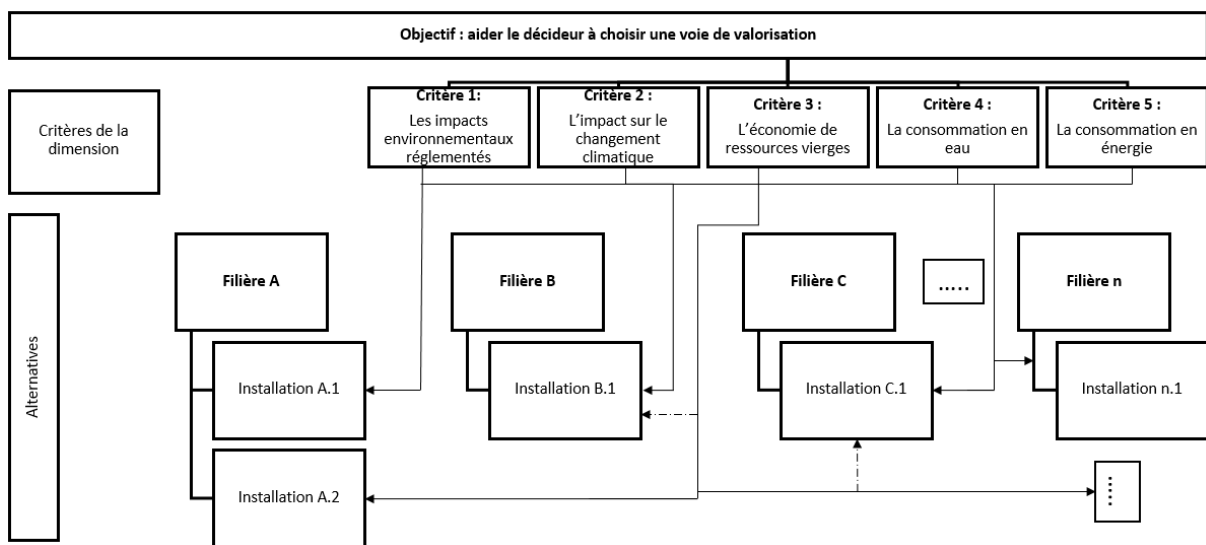
**Justifications :**

**Annexe 1 du questionnaire : Échelle proposée par Saaty :**

ÉCHELLES VERBALES	ÉCHELLES NUMERIQUES	COMMENTAIRES
Les deux éléments sont égaux	1	Deux éléments contribuent autant à la propriété
L'élément domine modérément l'autre	3	L'expérience et l'appréciation personnelles favorisent légèrement un élément par rapport à un autre
L'élément domine l'autre	5	L'expérience et l'appréciation personnelles favorisent fortement un élément par rapport à un autre
L'élément domine très fortement l'autre	7	Un élément est fortement favorisé et sa dominance est attestée dans la pratique
L'élément est absolument dominant	9	Les preuves favorisant un élément par rapport à un autre sont aussi convaincantes que possible

Les valeurs intermédiaires (2, 4, 6, 8) peuvent être utilisées pour affiner le jugement

**Annexe 2 du questionnaire : Structure AHP des critères de la dimension environnementale**



## ANNEXES DU CHAPITRE 4

## Annexe 4.1 : Résultats des pondérations sur la dimension réglementaire

Le tableau regroupe l'ensemble des éléments concernant les échelles d'évaluation, le poids des critères. Il précise également le score, à savoir la note sur l'échelle d'évaluation pondérée par le poids du critère. On remarque que les plus grands changements dans le résultat des scores interviennent uniquement pour les premiers niveaux des critères  $R_3$  — *Respect des objectifs* et le critère  $R_2$  — *Niveaux de responsabilité* de l'agrégation amont. En ce qui concerne les autres scores des installations sur les critères, ils sont soit semblables soit très proches.

N°	Echelle des critères	Agrégation Amont						Agrégation Aval					
		Arithmétique			Géométrique			Arithmétique			Géométrique		
		Notes	Poids	Score	Notes	Poids	Score	Notes	Poids	Score	Notes	Poids	Score
<b>R<sub>1</sub></b>	<b>R<sub>1</sub> — respect de la hiérarchie de gestion des déchets</b>												
	Préparation en vue de la réutilisation.	0,48	0,53	0,25	0,47	0,52	0,24	0,47	0,47	0,22	0,46	0,51	0,23
	Recyclage	0,26		0,14	0,25		0,13	0,26		0,12	0,25		
	Recyclage	0,15		0,08	0,16		0,08	0,17		0,08	0,16		
	Énergétique	0,08		0,03	0,09		0,05	0,09		0,04	0,09		
Élimination	0,03	0,00		0,03	0,02		0,03	0,01		0,03			
<b>R<sub>2</sub></b>	<b>R<sub>2</sub> Niveau de responsabilité</b>												
	Non	0,66	0,22	0,15	0,62	0,14	0,09	0,59	0,19	0,11	0,56	0,14	0,08
	Oui	0,23		0,05	0,25		0,04	0,26		0,05	0,24		
« Peut être »	0,10	0,02		0,13	0,02		0,15	0,03		0,13			
<b>R<sub>3</sub></b>	<b>R<sub>3</sub> — Respect du principe de proximité</b>												
	Installation a	$\alpha$	0,15	$\alpha*0,15$	$\alpha$	0,16	$\alpha*0,16$	$\alpha$	0,15	$\alpha*0,15$	$\alpha$	0,16	$\alpha*0,16$
	Installation b	$\beta$		$\beta*0,15$	$\beta$		$\beta*0,16$	$\beta$		$\beta*0,15$	$\beta$		
	....	$\varepsilon$		$\varepsilon*0,15$	$\varepsilon$		$\varepsilon*0,16$	$\varepsilon$		$\varepsilon*0,15$	$\varepsilon$		
Installation n	$\theta$	$\theta*0,15$		$\theta$	$\theta*0,16$		$\theta$	$\theta*0,15$		$\theta$			
<b>R<sub>4</sub></b>	<b>R<sub>4</sub> — Positionnement de la gestion vis-à-vis des objectifs de valorisation</b>												
	La filière est correcte	0,71	0,10	0,071	0,71	0,18	0,13	0,71	0,19	0,13	0,71	0,19	0,13
	La filière est acceptable	0,23		0,02	0,23		0,04	0,23		0,04	0,23		
La filière est déconseillée	0,06	0,01		0,06	0,01		0,06	0,01		0,06			

Les résultats (notes et poids) géométrique de l'agrégation amont ont été normalisés afin qu'ils se situent toujours entre 0 et 1. Ainsi la somme des notes des éléments de l'échelle de cotation d'un critère est égale à 1.

**Annexe 4.2 : L'intensité concurrentielle dans les travaux de la littérature**

REFERENCE	MESURE UTILISEE	OBJECTIF DE LA RECHERCHE
Chen (1996)	Il est demandé aux répondants d'indiquer par ordre d'importance dans une liste de 13 concurrents, les cinq compagnies aériennes avec lesquelles la rivalité est la plus élevée.	Etudier l'impact de la concurrence multi marchés et de la similarité stratégique sur la rivalité entre deux concurrents
Cooper et Kleinschmidt (1990)	Une dimension (3 Items) 1. Le nombre de concurrents 2. L'intensité de la concurrence 3. Le degré de concurrence sur les prix	Déterminer les facteurs de succès des nouveaux produits
Kohli et Jaworski (1990)	Une dimension (6 items) 1. La concurrence dans notre industrie est acharnée 2. La guerre promotionnelle est intense dans notre industrie 3. Chaque fois qu'un concurrent fait quelque chose, les autres le font rapidement 4. Dans notre industrie, le prix est l'élément principal de la lutte concurrentielle 5. On entend parler très souvent d'une nouvelle manoeuvre concurrentielle 6. Nos concurrents sont relativement lents	Déterminer les antécédents et les conséquences de l'orientation marchée
Lee et O'Connor (2003)	Une dimension (5 items) : 1. Le nombre de concurrents 2. L'intensité de la lutte des prix 3. L'intensité concurrentielle dans l'industrie 4. L'intensité du système de distribution des concurrents principaux 5. L'intensité de la publicité des concurrents principaux	Etudier le rôle modérateur de la nouveauté du produit dans la communication des nouveaux produits.
Li et Calantone (1998)	Une dimension (4 items) Le marché de ce produit 1. est prévisible/non prévisible 2. n'est pas concurrentiel/très concurrentiel 3. les parts de marché sont stables/volatiles 4. a peu de nouveaux concurrents/beaucoup de nouveaux concurrents	Etudier l'impact des compétences liées aux connaissances du marché sur l'avantage des nouveaux produits.
Pulendran, Speed, & Widing (2000)	Une dimension (5 items) 1. La concurrence dans notre industrie est acharnée 2. Il existe une guerre promotionnelle intense dans notre industrie 3. Chaque fois qu'un concurrent fait quelque chose, les autres le font rapidement 4. Dans notre industrie le prix est l'élément principal de la lutte concurrentielle 5. On entend parler très souvent d'une nouvelle manoeuvre concurrentielle	Déterminer les antécédents et les conséquences de l'orientation marchée
Muller (2002)	Un seul item. Il est demandé aux répondants d'indiquer si le marché est très concurrentiel, moyennement concurrentiel ou peu concurrentiel L'intensité concurrentielle est « forte » lorsque le répondant a indiqué un marché très concurrentiel et « faible » lorsqu'il a indiqué « un marché moyennement concurrentiel » ou « un marché peu concurrentiel ».	Etudier l'influence de la réaction concurrentielle sur la performance des nouveaux produits et le rôle modérateur des caractéristiques du marché.
Song et Parry, (1997)	Une dimension (3 items) 1. Les consommateurs potentiels pour ce produit étaient très fidèles aux produits des concurrents sur ce marché 2. Il existe un concurrent qui domine le marché (avec une part de marché très élevée) 3. Les consommateurs potentiels pour ce produit étaient très satisfaits des produits des concurrents.	Déterminer les facteurs de succès de nouveaux produits

**Annexe 4.3 : Détails des critères du thésaurus de Bercy pour le cas du B to B****Critère « La dynamique du marché I »**

<b>DYNAMIQUE MARCHÉ I</b>		
<b>NOTE</b>	<b>CROISSANCE</b>	<b>IMPACTS DE LA REGLEMENTATION SUR LA CROISSANCE</b>
20	plus de 10 %	Fort impact positif (plus de 10 % de croissance attendue)
15	10 %	Impact positif (10 % de croissance attendue)
10	Quelques %	Faible impact (quelques %)
5	Stable	Pas d'impact et marché stable
0	En décroissance	Fort impact négatif confirmé

**Critère « La dynamique du marché II »**

<b>DYNAMIQUE MARCHÉ II</b>		
<b>NOTE SI LA CROISSANCE EST POSITIVE</b>	<b>NOTE SI LA CROISSANCE EST NEGATIVE OU NULLE</b>	<b>STABILITE DU MARCHÉ (ETUDE ECONOMIQUE OU APPRECIATION)</b>
1,2	0	Fort impact positif (plus de 10 % de croissance attendue)
1	0,5	Impact positif (10 % de croissance attendue)
0,8	1	Faible impact (quelques %)
0,5	1,1	Pas d'impact et marché stable
0,2	1,2	Fort impact négatif confirmé

**Critère « Coefficient multiplicateur de la croissance »**

<b>COEFFICIENT MULTIPLICATEUR DE LA CROISSANCE</b>	
<b>NOTE</b>	<b>POIDS DU PREMIER CLIENT DANS LE CA</b>
1	5 %
0,95	10 %
0,8	20 %
0,7	30 % et plus
0,4	50 % et plus



**Annexe 4.4 : Détails des critères du thésaurus de Bercy pour le cas du B to C**

## Critère « La taille du marché »

TAILLE DU MARCHÉ ACCESSIBLE		
NOTE	TAILLE	DYNAMIQUE DU MARCHÉ
20	Mondial	Plus de 10 %
15	National	10 %
10	Régional	Quelques %
5	Local	Stable
0	Absent	En décroissance

## Critère « Coefficient multiplicateur de la croissance : Dynamique de marché »

DYNAMIQUE MARCHÉ		
NOTE SI LA CROISSANCE EST POSITIVE	NOTE SI LA CROISSANCE EST NEGATIVE OU NULLE	STABILITE DU MARCHÉ (ETUDE ECONOMIQUE OU APPRECIATION)
1,2	0	Stable à long terme
1	0,5	Stable à moyen terme
0,8	1	Stable a court terme (instable)
0,5	1,1	Chaotique et imprévisible
0,2	1,2	En retournement

### Annexe 4.5 : Résultats des pondérations sur la dimension économique

Le tableau ci-dessous regroupe l'ensemble des éléments concernant les échelles d'évaluation et le poids des critères. Il précise également le score, à savoir la note sur l'échelle d'évaluation pondérée par le poids du critère. On remarque qu'il n'y a pas de véritablement de grand écart dans les scores selon les différentes méthodes de calcul et d'agrégation des avis d'expert.

N°	Echelle des critères	Agrégation Amont						Agrégation Aval					
		Arithmétique			Géométrique			Arithmétique			Géométrique		
		Notes	Poids	Score	Notes	Poids	Score	Notes	Poids	Score	Notes	Poids	Score
<b>Ec<sub>1</sub> – Coût d'utilisation de la filière</b>													
Ec <sub>1</sub>	Installation a	$\alpha$	0,68	$\alpha*0,15$	$\alpha$	0,59	$\alpha*0,16$	$\alpha$	0,57	$\alpha*0,15$	$\alpha$	0,58	$\alpha*0,16$
	Installation b	$\beta$		$\beta*0,15$	$\beta$		$\beta*0,16$	$\beta$		$\beta*0,15$	$\beta$		$\beta*0,16$
	...	...		...	...		...	...		...	...		
	Installation n	$\epsilon$		$\epsilon*0,15$	$\epsilon$		$\epsilon*0,16$	$\epsilon$		$\epsilon*0,15$	$\epsilon$		$\epsilon*0,16$
<b>Ec<sub>2</sub> – Intensité concurrentielle</b>													
Ec <sub>2</sub>	$\geq 10$	0,51	0,10	0,051	0,47	0,10	0,051	0,47	0,10	0,051	0,47	0,10	0,051
	$\geq 5$	0,30		0,030	0,33		0,030	0,32		0,030	0,32		0,030
	$\geq 3$	0,14		0,014	0,14		0,014	0,14		0,014	0,14		0,014
	1	0,06		0,006	0,06		0,006	0,06		0,006	0,06		0,006
<b>Ec<sub>3</sub> – Intensité de la demande</b>													
Ec <sub>3</sub>	Filière avec des capacités excédentaires	0,63	0,23	0,15	0,55	0,31	0,17	0,53	0,34	0,18	0,54	0,32	0,17
	Filière à l'équilibre	0,28		0,06	0,33		0,10	0,32		0,11	0,34		0,11
	Filière sous tension	0,09		0,02	0,12		0,04	0,15		0,05	0,12		0,04
Les résultats (notes et poids) géométrique de l'agrégation amont ont été normalisés afin qu'ils se situent toujours entre 0 et 1. Ainsi la somme des notes des éléments de l'échelle de cotation d'un critère est égale à 1.													

### Annexe 4.6 : Résultats des pondérations sur la dimension technique

Le tableau regroupe l'ensemble des éléments concernant les échelles d'évaluation, le poids des critères. Il précise également le score, à savoir la note sur l'échelle d'évaluation pondérée par le poids du critère. On remarque que ni la méthode d'agrégation amont ou aval ni la moyenne géométrique ou arithmétique, n'influencent les scores finaux pour chacun des critères.

N°	Echelle des critères	Agrégation Amont						Agrégation Aval					
		Arithmétique			Géométrique			Arithmétique			Géométrique		
		Notes	Poids	Score	Notes	Poids	Score	Notes	Poids	Score	Notes	Poids	Score
<b>T<sub>1</sub></b>	<b>T<sub>1</sub> — Pérennité de l'installation</b>												
	≥ 10	0,56	0,42	0,24	0,56	<b>0,36</b>	0,20	0,55	0,33	0,18	0,55	0,37	0,20
	5	0,26		0,11	0,26		0,09	0,27		0,09	0,27		0,09
	3	0,13		0,05	0,13		0,05	0,14		0,05	0,14		0,05
	1	0,05		0,02	0,05		0,02	0,05		0,02	0,05		0,02
<b>T<sub>2</sub></b>	<b>T<sub>2</sub> — Niveau de responsabilité</b>												
	Non	0,86	0,22	0,19	0,86	<b>0,20</b>	0,17	0,86	0,22	0,19	0,86	0,20	0,17
	Oui	0,14		0,03	0,14		0,03	0,14		0,03	0,14		0,03
<b>T<sub>3</sub></b>	<b>T<sub>3</sub> — Adéquation du produit dans une filière</b>												
	Non	0,86	0,12	0,10	0,86	<b>0,11</b>	0,09	0,86	0,12	0,10	0,86	0,12	0,10
	Oui	0,14		0,02	0,14		0,02	0,14		0,02	0,14		0,02
<b>T<sub>4</sub></b>	<b>T<sub>4</sub> — Multiplicité des produits</b>												
	≥ 10	0,65	0,09	0,06	0,64	<b>0,10</b>	0,06	0,62	0,07	0,04	0,63	0,08	0,05
	≥ 3	0,26		0,02	0,26		0,03	0,27		0,02	0,27		0,02
	1 ou 2	0,09		0,008	0,10		0,01	0,12		0,008	0,11		0,009
<b>T<sub>5</sub></b>	<b>T<sub>5</sub> — Capacité d'absorption annuelle de l'installation</b>												
	≥ 200 %	0,52	0,09	0,05	0,47	<b>0,12</b>	0,06	0,46	0,12	0,06	0,47	0,13	0,06
	100 %	0,30		0,03	0,31		0,04	0,29		0,04	0,31		0,04
	< 100 %	0,13		0,01	0,15		0,02	0,16		0,02	0,15		0,02
	< 50 %	0,06		0,005	0,07		0,008	0,08		0,008	0,07		0,009
<b>T<sub>6</sub></b>	<b>T<sub>6</sub> — Flexibilité d'absorption de l'installation</b>												
	Non	0,84	0,06	0,05	0,84	<b>0,11</b>	0,09	0,82	0,10	0,08	0,83	0,10	0,08
	Oui	0,16		0,01	0,16		0,02	0,18		0,02	0,17		0,02

Les résultats (notes et poids) géométrique de l'agrégation amont ont été normalisés afin qu'ils se situent toujours entre 0 et 1. Ainsi la somme des notes des éléments de l'échelle de cotation d'un critère est égale à 1.

## Annexe 4.7 : Indicateurs emploi

Au niveau international, on trouve les indicateurs de l'OCDE. Le même organisme, l'OCDE, a également créé un indicateur taux d'emploi. Celui-ci mesure l'utilisation des ressources de main-d'œuvre disponibles en divisant le nombre d'actifs occupés par la population en âge de travailler.

The OECD indicators on Employment Protection Legislation			
Protection of permanent workers against individual and collective dismissals	Protection of permanent workers against (individual) dismissal	Specific requirements for collective dismissal	Regulation on temporary forms of employment

En France, deux organismes, l'INSEE et Pole Emploi, s'occupent du suivi de l'emploi au niveau du territoire. Ces 2 organismes publient régulièrement des données sur l'emploi. Ces derniers ont été jugé non pertinents pour l'étude puisqu'il s'agit surtout d'indicateurs de suivi.

Dans un contexte d'économie circulaire, plusieurs études ont été faites pour mesurer le nombre d'emploi<sup>71</sup> lié à la gestion des déchets. On peut regrouper ces études en 3 catégories :

- La mesure du nombre d'emploi lié à la gestion des déchets et à l'économie circulaire à une échelle internationale ;
- La mesure du nombre d'emploi lié à la gestion des déchets et à l'économie circulaire en France ;
- La mesure du potentiel de création d'emploi dans la gestion des déchets et dans un contexte d'économie circulaire en France.

Vincent Aurez et Laurent Geogault identifient 2 méthodes pour évaluer l'emploi lié à la gestion des déchets dans un contexte d'économie circulaire. Cependant, ces méthodes sont plutôt des indicateurs de suivi à une échelle macro-économique puisque cela consiste à extrapoler en France, des chiffres calculés par Morgan et Mitchell pour le Royaume — Unis.

Enfin, l'ADEME et l'US PEA proposent d'estimer le nombre d'emploi à partir du mode de traitement :

Mode de traitement	Nombres d'emplois créés (ETP) pour 10 000 t traitées (ADEME)
Mise en installation de stockage	1
Incinération	3 à 4
Compostage ou méthanisation	11
Démantèlement	50
Mode de traitement	Nombres d'emplois créés (ETP) pour 10 000 t traitées (US EPA)
Incinération	1
Mise en installation de stockage	6
Recyclage	36

En conclusion, cet état de l'art montre qu'il existe plusieurs indicateurs pour mesurer l'emploi. Il s'agit de mesurer un taux d'emploi, qui est ensuite décliné soit par secteur d'activité, par région, ou sur une échelle temporelle ou géographique différente. Nous retenons la construction proposé par US EPA et l'ADEME

<sup>71</sup> L'analyse de ces études montre que la mesure ou l'estimation des emplois se sont en équivalent temps plein (ETP).

## Annexe 4.8 : Résultats des pondérations sur la dimension territoriale

N°	Echelle des critères	Agrégation Amont						Agrégation Aval					
		Arithmétique			Géométrique			Arithmétique			Géométrique		
		Notes	Poids	Score	Notes	Poids	Score	Notes	Poids	Score	Notes	Poids	Score
Ter <sub>1</sub>	<b>Ter<sub>1</sub> - Favoriser l'économie locale</b>												
	Local	0,45	0,40	0,18	0,44	0,37	0,16	0,44	0,34	0,15	0,44	0,36	0,16
	Département	0,29		0,12	0,30		0,11	0,30		0,13	0,30		0,11
	Région	0,15		0,06	0,15		0,06	0,15		0,07	0,15		0,06
	France	0,08		0,03	0,08		0,03	0,08		0,04	0,08		0,03
	Hors France	0,03		0,012	0,03		0,011	0,03		0,01	0,03		0,01
Ter <sub>2</sub>	<b>Ter<sub>2</sub> — Utilisation locale de la ressource</b>												
	Local	0,45	0,27	0,09	0,44	0,25	0,11	0,44	0,24	0,11	0,44	0,25	0,11
	Département	0,29		0,08	0,29		0,07	0,29		0,07	0,29		0,07
	Région	0,15		0,04	0,16		0,04	0,16		0,04	0,16		0,04
	France	0,07		0,02	0,07		0,02	0,08		0,02	0,07		0,02
	Hors France	0,03		0,008	0,03		0,008	0,03		0,008	0,03		0,008
Ter <sub>3</sub>	<b>Ter<sub>3</sub> — Capacité à transporter le déchet sur le territoire</b>												
	<b>Sous critères</b>	<b>Poids</b>			<b>Poids</b>			<b>Poids</b>			<b>Poids</b>		
	Ter <sub>3.1</sub>	0,83			0,81			0,76			0,79		
	Ter <sub>3.1</sub>	0,17			0,19			0,24			0,21		
Ter <sub>3</sub>	0,14			0,12			0,12			0,12			
Ter <sub>4</sub>	<b>Ter<sub>4</sub> — Emploi</b>												
	≥ 64	0,55	0,14	0,08	0,52	0,17	0,09	0,51	0,19	0,10	0,51	0,18	0,09
	≥ 18	0,28		0,04	0,29		0,05	0,28		0,05	0,29		0,05
	≈ 7 à 3	0,12		0,02	0,13		0,02	0,14		0,03	0,13		0,02
	≈ 1	0,05		0,007	0,06		0,009	0,08		0,02	0,06		0,011
Ter <sub>5</sub>	<b>Ter<sub>5</sub> — Incitations locales (politique, économique, réglementaire)</b>												
	<b>Ter<sub>5.1</sub> — Dynamique d'Économie Industrielle et Territoriale (EIT) sur le territoire</b>												
	Poids Ter <sub>5</sub>	0,05			0,08			0,10			0,08		
	≥ 40	0,50	0,46	0,23	0,47	0,37	0,17	0,46	0,36	0,17	0,46	0,35	0,16
	≥ 30	0,28		0,13	0,29		0,11	0,28		0,10	0,29		0,10
≥ 20	0,15	0,07		0,16	0,06		0,16	0,06		0,16	0,06		
≥ 10	0,07	0,03		0,08	0,03		0,10	0,04		0,09	0,03		
Ter <sub>5.2</sub>	<b>Ter<sub>5.2</sub> — Sensibilité territoriale pour la valorisation des déchets</b>												
	≥ 7	0,50	0,37	0,19	0,46	0,39	0,18	0,45	0,35	0,16	0,46	0,38	0,17
	≥ 5	0,29		0,11	0,29		0,11	0,28		0,10	0,29		0,11
	≥ 3	0,15		0,06	0,16		0,06	0,16		0,06	0,16		0,06
	≥ 1	0,07		0,03	0,08		0,03	0,10		0,04	0,08		0,03
Ter <sub>5.3</sub>	<b>Ter<sub>5.3</sub> — Ambition territoriale pour la gestion des déchets</b>												
	Oui	0,79	0,18	0,14	0,78	0,25	0,20	0,75	0,29	0,22	0,76	0,28	0,21
	Non	0,21		0,04	0,22		0,06	0,25		0,07	0,24		0,07

### Annexe 4.9 : Résultats des pondérations sur la dimension environnementale

Le tableau regroupe l'ensemble des éléments concernant les échelles d'évaluations, le poids des critères. Il précise également le score, à savoir la note sur l'échelle d'évaluation pondérée par le poids du critère.

N°	Échelle du critère	Agrégation Amont						Agrégation Aval							
		Arithmétique			Géométrique			Arithmétique			Géométrique				
		Notes	Poids	Score	Notes	Poids	Score	Notes	Poids	Score	Notes	Poids	Score		
Env <sub>1</sub>	<b>Env<sub>2</sub> — Impacts environnementaux réglementés</b>														
	Sans impacts	0,70	0,46	0,32	0,70	0,40	0,28	0,70	0,40	0,28	0,70	0,41	0,29		
	Remis en cause	0,24		0,11	0,24		0,10	0,24		0,10	0,24		0,10	0,24	0,10
	Avec impacts	0,06		0,03	0,06		0,02	0,06		0,02	0,06		0,02	0,06	0,02
Env <sub>2</sub>	<b>Env<sub>2</sub> — Impacts sur le changement climatique</b>														
	Installation a	$\alpha$	0,25	$\alpha*0,25$	$\alpha$	0,25	$\alpha*0,25$	$\alpha$	0,22	$\alpha*0,22$	$\alpha$	0,23	$\alpha*0,23$		
	Installation b	$\beta$		$\beta*0,25$	$\beta$		$\beta*0,25$	$\beta$		$\beta*0,22$	$\beta$		$\beta*0,23$		
	...	...		...	...		...	...		...	...				
	Installation n	$\epsilon$		$\epsilon*0,25$	$\epsilon$		$\epsilon*0,25$	$\epsilon$		$\epsilon*0,22$	$\epsilon$		$\epsilon*0,23$		
Installation n	$\epsilon$	$\epsilon*0,25$		$\epsilon$	$\epsilon*0,25$		$\epsilon$	$\epsilon*0,22$		$\epsilon$	$\epsilon*0,23$				
Env <sub>3</sub>	<b>Env<sub>3</sub> – Économie de matières premières vierges</b>														
	$\geq 80\%$	0,57	0,18	0,10	0,56	0,22	0,12	0,56	0,22	0,12	0,56	0,21	0,12		
	$\geq 60\%$	0,26		0,05	0,27		0,06	0,27		0,06	0,27		0,06	0,27	
	$\geq 40\%$	0,13		0,02	0,12		0,03	0,13		0,03	0,13		0,03	0,13	
	$\geq 20\%$	0,04		0,007	0,04		0,008	0,05		0,008	0,05		0,008	0,05	
Env <sub>4</sub>	<b>Env<sub>4</sub> – Consommation en eau</b>														
	Installation a	$\alpha$	0,07	$\alpha*0,07$	$\alpha$	0,07	$\alpha*0,07$	$\alpha$	0,08	$\alpha*0,08$	$\alpha$	0,08	$\alpha*0,08$		
	Installation b	$\beta$		$\beta*0,07$	$\beta$		$\beta*0,07$	$\beta$		$\beta*0,08$	$\beta$		$\beta*0,08$		
	...	...		...	...		...	...		...	...				
	Installation n	$\epsilon$		$\epsilon*0,07$	$\epsilon$		$\epsilon*0,07$	$\epsilon$		$\epsilon*0,08$	$\epsilon$		$\epsilon*0,08$		
Env <sub>5</sub>	<b>Env<sub>5</sub> – Consommation en énergie</b>														
	Installation a	$\alpha$	0,05	$\alpha*0,05$	$\alpha$	0,07	$\alpha*0,07$	$\alpha$	0,08	$\alpha*0,08$	$\alpha$	0,08	$\alpha*0,08$		
	Installation b	$\beta$		$\beta*0,05$	$\beta$		$\beta*0,07$	$\beta$		$\beta*0,08$	$\beta$		$\beta*0,08$		
	...	...		...	...		...	...		...	...				
	Installation n	$\epsilon$		$\epsilon*0,05$	$\epsilon$		$\epsilon*0,07$	$\epsilon$		$\epsilon*0,08$	$\epsilon$		$\epsilon*0,08$		





## ANNEXES DU CHAPITRE 5

### Annexe 5.1 : Détail réglementaire lié au transport de déchets amiantés.

Le tableau ci-dessous présente les différents types de “Big-bags” pour contenir les déchets d’amiante :

NOM	ILLUSTRATION	DIMENSION
Milieu-Bag (1 min 3 s) (Big Bag)		910x910x1050 mm
Dépôt-Bag (160 cm)		110x1600x500 mm
Dépôt-Bag (260 cm)		1200x2600x300 mm
Dépôt-Bag (310 cm)		1100x3100x300 mm
Body Benne		6200x2400x1150 mm

Certains emballages non agréés sont utilisés pour le transport des déchets d’amiante lié bénéficiant de la DS 168. Ainsi, le “dépôt-bag” est adapté aux dimensions des plaques de couverture en amiante-ciment. Le “dépôt-benne” est adapté aux quantités plus importantes de déchets d’amiante lié (plaques et gaines en amiante-ciment, chargé en vrac dans cet emballage doublé d’une sache intérieure en polyéthylène et de rabats de fermeture). L’amiante libre (ou lié Non Intègre) doit être conditionné uniquement en Big Bag (seul emballage agréé) et fermé en col de cygne. Appelé aussi GRV<sup>72</sup> 13H3/Y, il se différencie des autres sacs de conditionnement par ses nombreux marquages :



<sup>72</sup> Grand Récipient pour Vrac

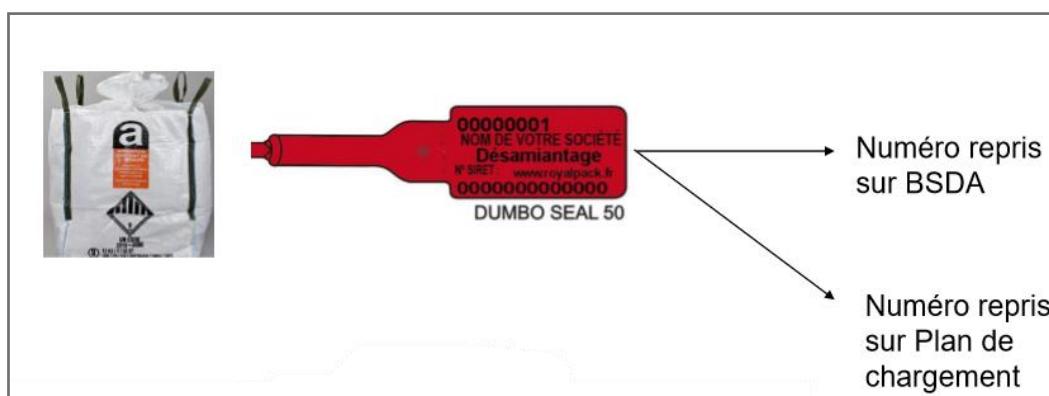
### La réglementation relative au transport

Les déchets d'amiante doivent être transportés et déplacés dans des conditions permettant d'éviter l'envoi de fibres (emballage) et le transport de déchets d'amiante est soumis aux dispositions du règlement ADR (étiquetage). ADR, pour « *Accord for dangerous goods by road* » est un règlement international le transport des marchandises dangereuses par la route qui s'applique l'ensemble des pays de l'Europe Continentale, y compris la Russie.

Le transport de déchets amiantés doit être réalisé en respectant cette réglementation. Selon celle-ci, l'amiante est référencé en classe 9, ce qui implique l'utilisation de véhicules adaptés, d'un conditionnement particulier et d'un personnel spécialement formé et équipé pour ce type de transport. Suivant la nature des déchets, la réglementation ADR spécifie la classe de danger, le code de classification, le groupe d'emballage, la nature des étiquettes, les dispositions spéciales, les instructions d'emballage.

NUMERO ONU	CLASSE	DESIGNATION OFFICIELLE DE TRANSPORT	GROUPE D'EMBALLAGE
UN 2212	9	Amiante, Amphibole	II
UN 2590	9	Amiante, Chrysotile III	III
En l'absence d'un diagnostic sûr : classement par défaut sous UN 2212 (le plus dangereux au sens de l'ADR)			

Ce règlement prévoit que les colis de déchets d'amiante libre destinés à être éliminés dans les installations de stockage de déchets dangereux ou en inertage seront placés pour le transport dans un emballage supplémentaire conforme et muni obligatoirement d'un scellé numéroté. Ce scellé comporte le numéro de SIRET du producteur du déchet et le numéro d'identification du colis. Il est obligatoire dans le cas d'un envoi en ISDD comme dans le cas d'une valorisation.



Le transporteur doit également signaler son chargement de déchets amiantés. Ainsi, la signalisation du transport de marchandise dangereuses de classe 9 doit être présent sur le véhicule.

De plus, les colis sont obligatoirement accompagnés d'un BSDA (Bordereau de Suivi des Déchets d'Amiante — Formulaire CERFA 11861 — un par famille de déchet et par unité d'envoi).

Dans certains cas, les déchets amiantés peuvent disposer d'une dérogation à la réglementation ADR. En effet, les déchets d'amiante lié peuvent être exemptés (partielle ou totale) de l'application de l'ADR aux conditions que l'amiante est fixé dans un liant et que le conditionnement assure l'étanchéité complète du colis dans des conditions normales de transport.

Le règlement RID pour le rail, l'ADNR pour la voie fluviale et l'IMDG pour la voie maritime ont la même structure que l'ADR avec bien sûr les particularités liées au mode de transport.

**Annexe 5.2 : Liste des ISDD**

N	NOM DU SITE	EXPLOITANT	COMMUNE	DEP.	X	Y	SYSTEME DE PROJECTION
1	ISDD D'ARGENCES	SOLICENDRE	ARGENCES	14	418 094	2 463 095	Lambert 2 étendu
2	CET DE DRAMBON CLASSES 1 ET 2	SITA FRANCE DECHETS	DRAMBON	21	830 558	2 262 911	Lambert 2 étendu
3	ISDD DE VAIVRE-PUSEY	SITA FRANCE DECHETS	VAIVRE-ET-MONTOILLE	70	882 715	2 301 405	Lambert 2 étendu
4	ISDD DE SAINT-MARCEL	CERED — SITA FRANCE DECHETS	SAINT-MARCEL	27	532 570	2 456 230	Lambert 2 étendu
5	ISDD DE TOURVILLE-LA-RIVIERE	SERAF	TOURVILLE-LA-RIVIERE	76	507 598	2 480 290	Lambert 2 étendu
6	ISDD DE VILLEPARISIS	SITA FD	VILLEPARISIS	77	619 958	2 436 553	Lambert 2 étendu
7	ISDD DE GUITRANCOURT	EMTA	ISSOU	78	559 884	2 444 926	Lambert 2 étendu
8	ISDD DE BELLEGARDE	SITA FD	BELLEGARDE	30	771 501	1 860 561	Lambert 2 étendu
9	ISDD DE JEANDELAINCOURT	SITA FD	JEANDELAINCOURT	54	887 532	2 434 072	Lambert 2 étendu
10	ISDD DE LAIMONT	SITA FRANCE DECHETS	LAIMONT	55	797 842	2 430 655	Lambert 2 étendu
11	ISDD DE VIVIEZ	UMICORE BUILDING PRODUCTS FRANCE	VIVIEZ	12	590 800	1 950 394	Lambert 2 étendu
12	ISDD DE GRAULHET	OCCITANIS	GRAULHET	81	576 962	1 863 719	Lambert 2 étendu
13	ISDD DE CHAMPTEUSSE-SUR-BACONNE	SEDA	CHAMPTEUSSE-SUR-BACONNE	49	376 588	2 299 808	Lambert 2 étendu
14	ISDD DE L'OISONNIERE	SECHE ECO INDUSTRIES	CHANGE	53	363 292	2 351 259	Lambert 2 étendu
15	ISDD DE SAINT-CYR-DES-GATS	SOLITOP	SAINT-CYR-DES-GATS	85	352 789	2 181 711	Lambert 2 étendu
16	ISDD DE SURY-LE-COMTAL	SARP INDUSTRIES RHONE ALPES	SURY-LE-COMTAL	42	744 988	2 059 739	Lambert 2 étendu

**Annexe 5.3 : Liste des ISDND d'après FranceEau (Extrait)**

N	NOM DU SITE	EXPLOITANT	COMMUNE D'IMPLANTATION	X	Y	SYSTEME DE PROJECTION
1	CENTRE DE STOCKAGE DE DECHETS ULTIMES D'HOCHFELDEN	SITA ALSACE	HOCHFELDEN	984 934	2 428 518	Lambert 2 étendu
2	CENTRE DE STOCKAGE DE DECHETS ULTIMES DE WEITBRUCH	SYNDICAT MIXTE DE TRAITEMENT DES ORDURES MENAGERES DE HAGUENAU SAVERNE	WEITBRUCH	1 000 299	2 429 240	Lambert 2 étendu
3	CENTRE DE STOCKAGE DE DECHETS ULTIMES DE CHATENOIS	SYNDICAT MIXTE DE COLLECTE ET TRAITEMENT DES ORDURES MENAGERES D'ALSACE CENTRALE	CHATENOIS	973 468	2 376 790	Lambert 2 étendu
4	CENTRE DE STOCKAGE DE DECHETS ULTIMES DE WINTZENBACH	SYNDICAT MIXTE DE COLLECTE ET TRAITEMENT DES ORDURES MENAGERES DU NORD DU BAS-RHIN	WINTZENBACH	1 022 021	2 451 585	Lambert 2 étendu
5	CENTRE DE STOCKAGE DE DECHETS ULTIMES DE RETZWILLER	SITA ALSACE	RETSWILLER	957 874	2 303 586	Lambert 2 étendu
6	SITA	SITA	MILHAC D'AUBEROCHE	491 672	2 011 689	Lambert 2 étendu
7	SMD3	SMD3	SAINT LAURENT DES HOMMES	433 479	2 008 172	Lambert 2 étendu
8	SOVAL	SOVAL	LAPOUYADE	393 521	2 017 736	Lambert 2 étendu
9	SMICOTOM	SYNDICAT MIXTE DE COLLECTE ET TRAITEMENT DES ORDURES MENAGERES	NAUJAC SUR MER	338 097	2 036 359	Lambert 2 étendu
10	CAUPENNE	SIETOM DE CHALOSSE	CAUPENNE	350 164	1 855 969	Lambert 2 étendu
11	MIMIZAN	GASCOGNE PAPER	MIMIZAN	312 874	1 918 272	Lambert 2 étendu
12	CENTRE D'ENFOUISSEMENT TECHNIQUE DE L'ALBIE	SYNDICAT MIXTE DE L'ARRONDISSEMENT DE VILLENEUVE-SUR-LOT	MONFLANQUIN	474 266	1 944 970	Lambert 2 étendu
13	FAUILLET	SYNDICAT MIXTE DE COLLECTE ET TRAITEMENT DES ORDURES MENAGERES LOT-GARONNE-BAÏSE	FAUILLET	436 172	1 938 934	Lambert 2 étendu
14	NICOLE	SYNDICAT MIXTE DE COLLECTE ET TRAITEMENT DES ORDURES MENAGERES LOT-GARONNE-BAÏSE	NICOLE	439 985	1 927 617	Lambert 2 étendu
15	ZALUAGA BI	BIZI GARBIA	SAINT-PEE-SUR-NIVELLE	282 864	1 827 967	Lambert 2 étendu
16	PRECILHON	SYNDICAT MIXTE DE TRAITEMENT DES DECHETS DU BASSIN EST	PRECILHON	363 633	1 804 964	Lambert 2 étendu
17	ORTHEZ	COMMUNE D'ORTHEZ	ORTHEZ	348 575	1 840 015	Lambert 2 étendu
18	HAZKETA	CEPB	HASPARREN	304485	1830839	Lambert 2 étendu
19	INSTALLATION DE STOCKAGE DE DECHETS NON DANGEREUX DE MAILLET-VILLENUE	COVED SA	MAILLET	623 367	2 163 834	Lambert 2 étendu
20	INSTALLATION DE STOCKAGE DE DECHETS NON DANGEREUX DE CUSSET	SITA MOS	CUSSET	691 115	2 127 147	Lambert 2 étendu

## Annexe 5.4 : Liste des ISDND d'après SINOE (extrait)

NOM	ADRESSE	ADRESSE (SUITE)	CODE POSTAL	COMMUNE	CAPACITE NOMINALE	RESTANTE	REGLEMENTAIRE	PROJET D'EXTENSION
Bioréacteur de Labessière	les Courtials	Pôle des énergies Renouvelables	81 300	Labessière-Candeil	180 000	300 000	180 000	Non
Carrière-isdnd Amiante Saint-martin-du-tertre	Isdi Picheta Route Départementale 909		95 270	Saint-Martin-du-Tertre	0	570 498	40 000	Oui
Centre Stockage Badaroux Lozère	Redoundel		48 000	Badaroux	22 000	80 000	14 000	Non
Centre de Clerac	le Bois Rousseau		17 270	Clérac	0	0	185 000	Oui
Centre de Sainte Severe	la Forêt de Jarnac		16 200	Sainte-Sévère	40 000	1 570 000	70 000	Non
Centre de Stockage de Hitia'a-o-te-ra	Adresse Nc		98 705	Hitia'a-O-Te-Ra	0	0	0	Non
Centre de Stockage Aire-sur-l'adour	Chemin du rouzet		40 800	Aire-sur-l'Adour	58 750	1 044 940	62 000	Non
Centre de Stockage Kourou	Kourou — Zone Pariacabo		97 310	Kourou	0	20 000	20 000	Non
Centre de Stockage Milhac-d'auberoche	Lieu Dit Madaillan		24 330	Milhac-d'Auberoche*	110 000	0	110 000	Non
Centre de Stockage Montblanc	Ecopole Vallasse		34 290	Montblanc	0	0	132 900	Non
Centre de Stockage Nuku-hiva	Bp N°28 — Taiohae		98742	Nuku-Hiva	0	0	0	Oui
Centre de Stockage Punaruu (classe 2, Catégorie 3)	Vallée de la Panaruu		98 718	Punaauia	0	10 000	80 000	Oui
Centre de Stockage Rapa	Rapa — Archipel des Australes		98 751	Rapa	0	0	0	Non
Centre de Stockage Saint-laurent	Saint Laurent — Piste Paul Isnard		97 360	Saint-Laurent-du-Maroni	13 474	0	13 530	Oui
Centre de Stockage Tubuai	Tubuai — Archipel des Australes		98 754	Tubuai	0	0	0	Non
Centre de Stockage Ua-pou	Ua Pou — Archipel des Marquises		98 745	Ua-Pou	0	0	0	Non
Centre de Stockage de Bora-bora	Baie de Pahonu Faanui		98 730	Bora-Bora	2796	57 900	2530	Oui
Centre de Stockage de Paihoro	Paihoro		98 722	Taiarapu-Est	60 000	540 000	80 000	Non
Centre de Stockage du Céron	Sainte-luce		97 228	Sainte-Luce	110 000	0	70 000	Non
Cet 2 Brametot	Route de Vénestanville		76 740	Brametot	45 000	685 719	45 000	Non
Cet 2 Camopi	Camopi		97 330	Camopi	140	840	200	Non



## ANNEXES DU CHAPITRE 6

### Annexe 6.1 : La classification des déchets de bois

La norme européenne NF EN 335-2 « Durabilité du bois et des matériaux dérivés du bois, partie 2 : application au bois massif » définit cinq classes d'emploi du bois « produit ». Ces classes sont définies selon l'exposition potentielle du bois à l'humidité. Plus un bois risque d'être soumis à l'humidité durant son utilisation, plus il nécessitera l'incorporation d'adjuvants lors de ses étapes de transformation. Le tableau en ci-après présente les classes et leur signification donnée dans la norme.

#### Classification des bois en fonction de l'exposition à l'humidité selon la norme NF EN 335-2

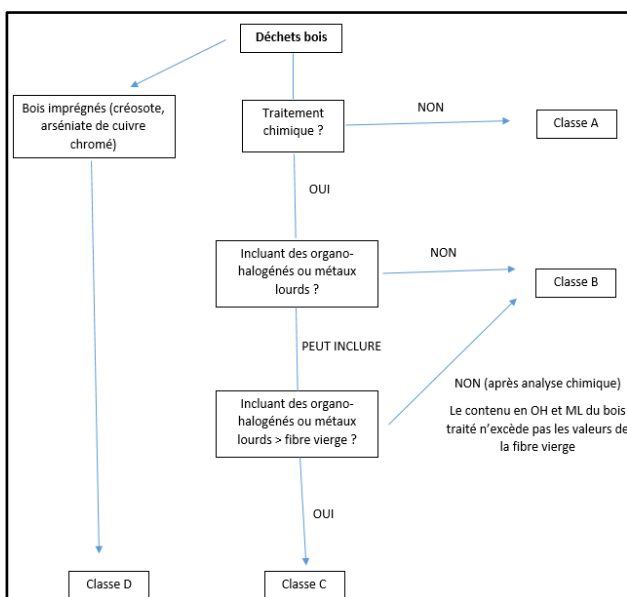
CLASSES	SITUATION EN SERVICE	EXEMPLES D'ADJUVANTS POTENTIELS
1	Bois sec, soumis à une humidité toujours inférieure à 20 %	– Colles et produits de finition – Biocides, fongicides, insecticides
2	Bois sec, soumis à une humidité qui peut occasionnellement dépasser 20 %	– Colles et produits de finition – Biocides, fongicides, insecticides
3A	Bois soumis à une humidité fréquemment supérieure à 20 %	– Pentachlorophénate de sodium (PCP) – Triazoles
3B	Bois soumis à une humidité fréquemment supérieure à 20 %	– CCA (oxydes ou sels de cuivres II, d'oxydes de chrome VI et d'oxydes d'arsenic) – CCB (sels de bore : cuivre chrome bore)
4	Bois soumis à une humidité toujours supérieure à 20 %	
5	Bois en contact permanent avec l'eau de mer	

Cette classification du bois « produit » (futur bois « déchets ») permet de définir une autre classification : celle des déchets de bois. Un bois faiblement ou fortement adjuvanté est plus ou moins dangereux pour l'homme et l'environnement. En France, les déchets de bois sont traditionnellement définis suivant les trois classes suivantes :

- Bois de type A : résidus de bois non adjuvantés ou bois bruts
- Bois de type B : déchets de bois faiblement adjuvantés
- Bois de type C : déchets de bois fortement adjuvantés

Aucune limite entre chacune des classes ne peut être faite, car aucun seuil chiffré ne les définit. Le schéma ci-dessous présente le lien qu'il est possible d'établir entre la classification définie par la norme NF EN 335-2 et celle définie traditionnellement en France.

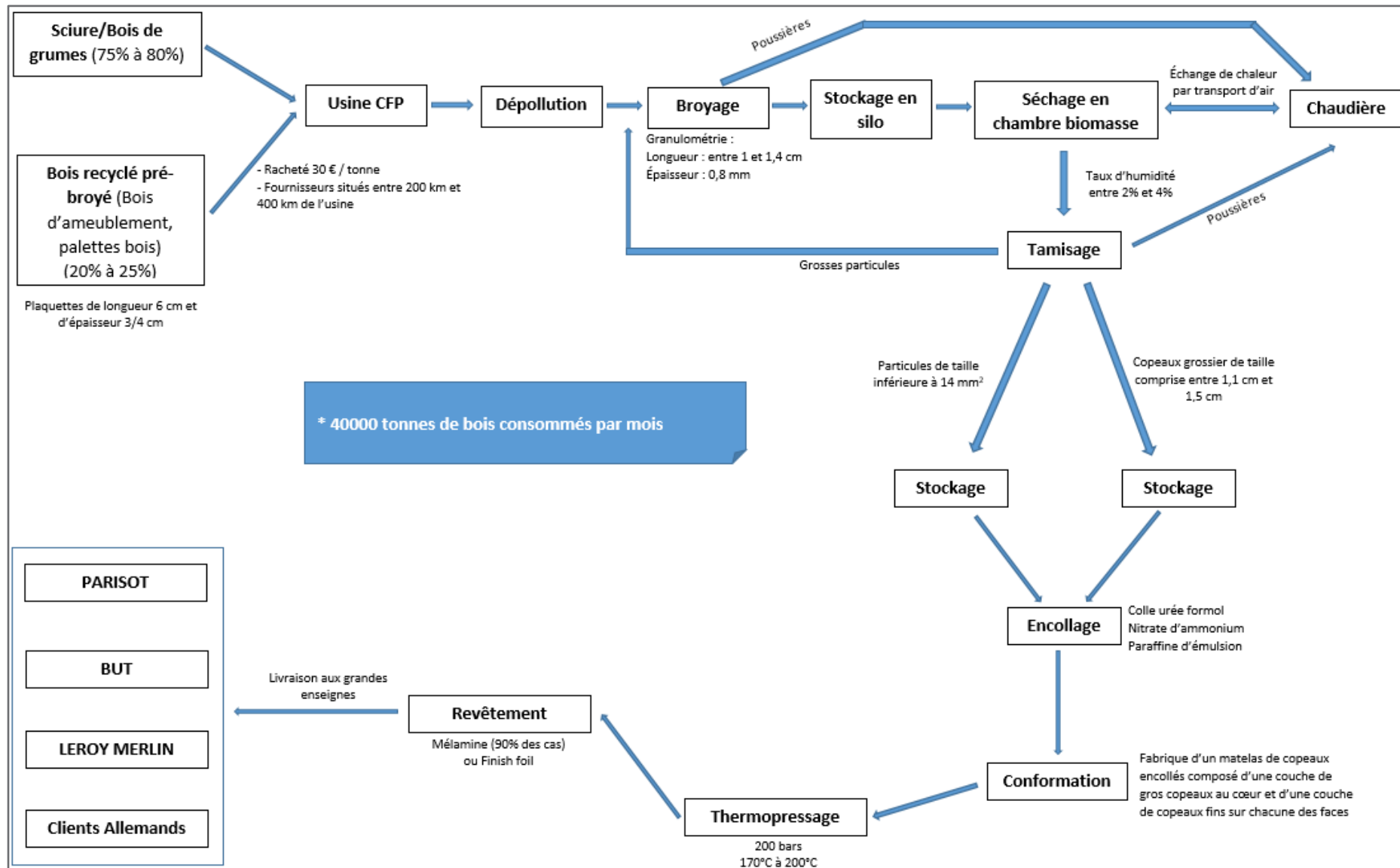
Entre 2003 et 2009, un groupe de travail pour la normalisation des combustibles bois a également proposé une classification des déchets de bois en quatre classes (A, B, C, D) :



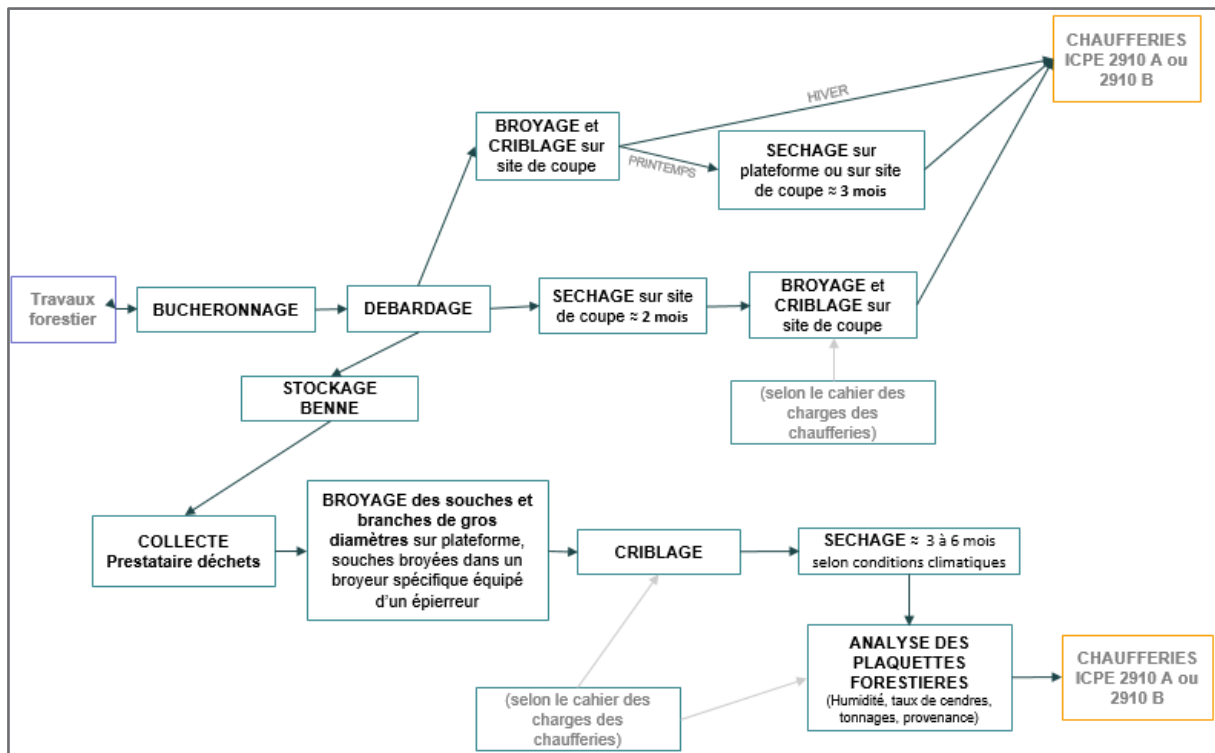
Parmi ces deux dernières classifications, aucune ne dispose en réalité d'un statut réglementaire. La classification est le plus souvent suggérée par les acteurs des filières bois de chaque pays.



**Annexe 6.2 : Les étapes clés dans la fabrication d'un panneau de particule**



**Annexe 6.3 : Étapes de préparation des « déchets » de bois d'essartement**



Une fois coupé et rassemblé, le bois d'essartement peut être soit :

- Broyé et criblé sur site de coupe, puis envoyé en chaufferie (en hiver),
- Broyé et criblé sur site de coupe, séché sur site de coupe ou sur une plateforme intermédiaire, puis envoyé en chaufferie (printemps),
- Séché (2 mois), broyé et criblé sur site de coupe, puis envoyé en chaufferie,
- Stocké en benne, récupéré par un prestataire, broyé, criblé et séché (3 à 6 mois) sur la plateforme du prestataire, puis envoyé en chaufferie.

Des analyses de broyat peuvent être demandées par les chaufferies.

Le broyage et le criblage est conditionné par le cahier des charges de la chaufferie de destination. La taille standard des plaquettes forestières est de 50 mm. Le bois d'essartement possède un taux d'humidité de l'ordre de 50 % juste après son bûcheronnage. Selon leurs caractéristiques, les chaudières peuvent accepter un taux d'humidité pour les plaquettes forestières compris entre 15 % et 65 %. Le tableau ci-après présente les différents types de foyers existant pour les chaudières bois. Les caractéristiques des plaquettes forestières pouvant servir comme combustibles sont présentées pour chaque type de foyer.

TYPE	PUISSANCE	COMBUSTIBLE
Foyers à grilles planes	15 kW à 800 kW	Humidité 10 % à 25 % Petites plaquettes et copeaux secs (3 cm grand côté)
Foyers à vis de poussée ou « foyers volcan »	25 kW à 5 000 kW	Humidité 15 % à 45 % Plaquettes (3 cm grand côté)
Foyers à grilles mobiles	120 kW à 25 MW	Humidité : 25 % à 50 % voire 60 % Granulométrie : 10 cm et jusque à 30 cm maximum
Foyers à grille rotative	2 MW à 25 MW	Humidité : 40 à 65 % Écorces, bois très humides
Foyers à lit fluidisé	20 MW à 600 MW	Humidité : jusqu'à 65 % Produits très humide, granulométrie fine

### Annexe 6.4 : Annexe liée aux déchets de bois flottant

Le bois flottant est difficilement caractérisable. Il constitue un déchet de classe A. Il est globalement composé de bois verts (arrachés) et de troncs d'arbres morts charriés par les rivières/fleuves. L'âge des bois est variable. Ce bois est habituellement récupéré au niveau des dégrilleurs des barrages par des prestataires sollicités par EDF. Les DREAL demandent désormais la récupération du bois flottant sur les tronçons en amont. Les bois peuvent être extraits depuis une barge à l'aide d'une pelle-araignée ou directement depuis les berges.

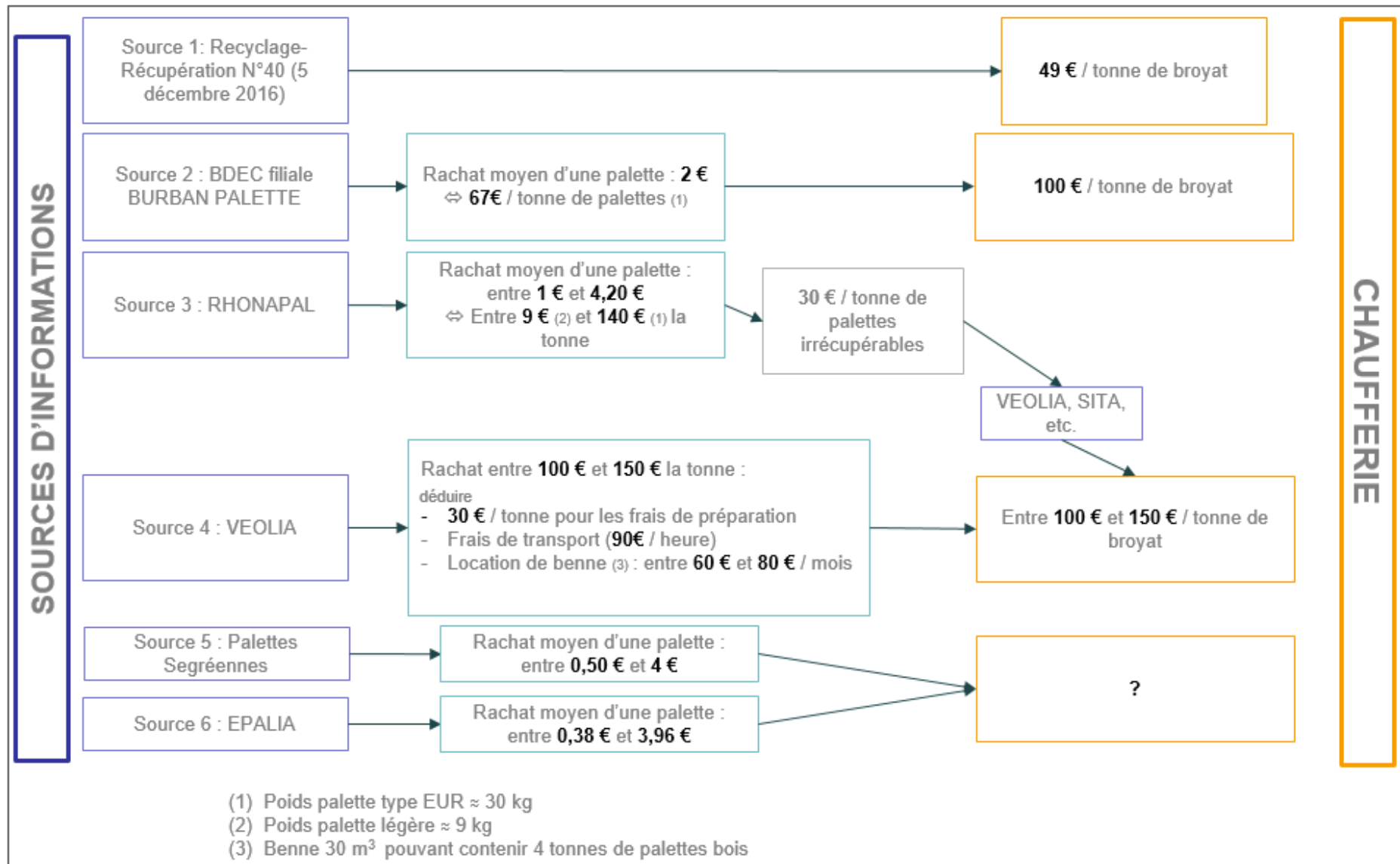
Les quantités de bois amassées fluctuent en fonction des crues et sont souvent mélangées à d'autres déchets flottants. De plus, les qualités de bois fluctuent. Ce sont ces problématiques qui empêchent le développement d'une filière de valorisation.



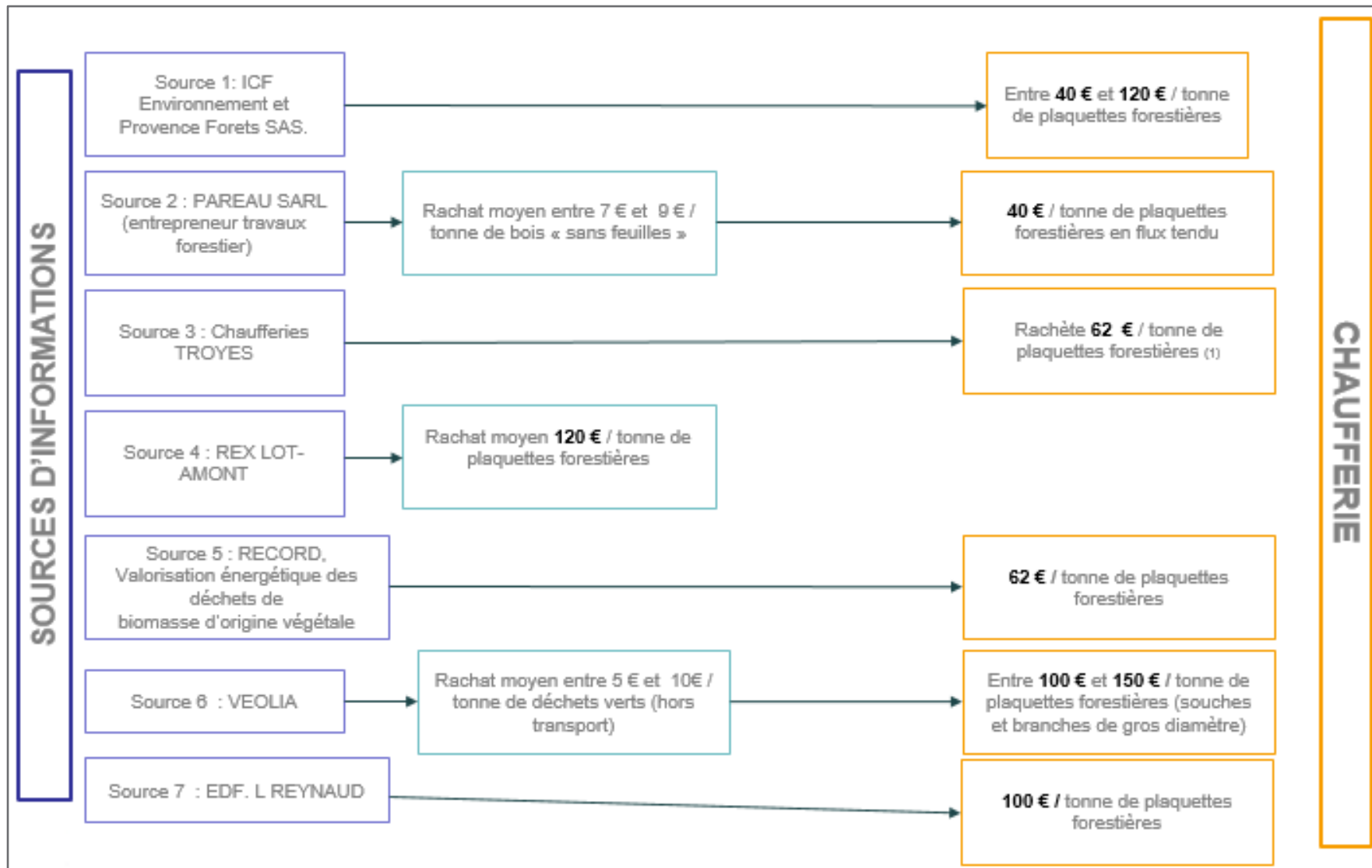
Entre 2013 et 2016, EDF a produit 9 000 tonnes des déchets de bois flottant. Le tableau ci-dessous présente les voies vers lesquelles ces déchets ont été dirigés :

	REEMPLOI	VALORISATION MATIERE (R3)	VALORISATION ENERGETIQUE (R1)	ÉLIMINATION (STOCKAGE D1, D5)	ÉLIMINATION (INCINERATION A TERRE D10)	NON APPROPRIÉE (R5, R10, R12, R13)
Bois flottant	-	52,50 %	47,20 %	0,10 %	0 %	0,20 %
Types de gestion	-	gestion correcte	gestion correcte	gestion acceptable	gestion acceptable	-

**Annexe 6.5 : Prix de revente des palettes bois et prix de revente du broyat de palettes bois**



**Annexe 6.6 : Prix de revente des plaquettes forestières et prix de revente aux chaufferies**



## **Annexe 6.7 : Annexe liée aux sédiments**

### **L'usine de Betschdorf (céramique)**

Il s'agit d'une briquetterie de la société Wienerberger, située à 58,4 km de l'écluse de Strasbourg. Il s'agit de la seule briquetterie d'Alsace avec l'usine d'Achenheim. Cette dernière emploie 50 salariés permanents et produit 15 000 tonnes de briques par mois qui seront distribuées principalement en région, mais également en Ile-de-France et au Nord de la France.

L'usine n'a jamais reçu de matériaux alternatifs pour une valorisation matière. Seule de la valorisation énergétique avec des boues de papier ou de la cire est à ce jour réalisée. Néanmoins, si le matériau est de bonne qualité (peu de coquilles et de grosses particules de calcaire), et que les tests préalables effectués en laboratoire montrent qu'il peut être intégré au cru, alors ce dernier pourrait être accepté dans l'installation. Le matériau pourrait alors être acheté : le directeur de l'usine Franck Gerva donne le prix indicatif de 5 €/t pour une matière première correcte. Dans le cas des sédiments de barrage, Franck Gerva pense, à titre indicatif, qu'il serait difficile d'en intégrer plus de 10 % dans le cru : cela reste néanmoins à confirmer par les tests préliminaires en laboratoire.

Ainsi, dans l'hypothèse où les sédiments de barrage seraient acceptés et remplaceraient 10 % du cru, l'usine pourrait accueillir en moyenne 20 000 tonnes de sédiments par an. L'usine dispose de terrains de stockage dans les carrières à proximité, et pourrait même stocker jusqu'à 10 000 tonnes de plus, en cas de surplus.

### **La plateforme S.A.R.M. (techniques routières)**

Il s'agit d'une plateforme de la société Colas dédiée à la collecte et au traitement des déchets inertes située à 1,5 km de l'écluse de Strasbourg. C'est une ICPE de la rubrique 2515 (Broyage, concassage,... et autres produits minéraux ou déchets non dangereux inertes) et 2517 (Produits minéraux ou déchets non dangereux inertes (transit)). L'installation reçoit principalement des déchets du BTP (blocs de béton, déblais de terres...), jusqu'à 120 000 tonnes par an, qui sont ensuite préparés (concassage, criblage) pour une valorisation en techniques routières dans les chantiers à proximité (30 km au plus). L'installation dispose également d'un stock tampon, pouvant recevoir jusqu'à 100 000 tonnes de surplus. En fonction de la qualité du matériau reçu (granulométrie, propreté), le coût varie de 0 €/t pour des matériaux routiers (béton, graviers) à 95 €/t HT pour des matériaux de démolition hétérogènes (présence de bois, plastiques, métaux à trier). Les déblais terreux auxquels seraient assimilés les sédiments sont reçus au coût de 8,70 €/t HT.

Néanmoins, cette plateforme n'a jamais reçu de sédiments de barrage, bien qu'elle soit en activité depuis 27 ans. D'après le responsable de la plateforme, Giuliano Pomilio, la faible granulométrie des sédiments rend leur valorisation en techniques routières plutôt difficile, sauf en cas de traitement à la chaux ou liant hydraulique comme préconisé par le GTR.

### **La plateforme Denni Legoll (valorisation agricole)**

La société Denni Legoll, affiliée au groupe Cetteria, dispose sur son site d'une plateforme de recyclage des déchets inertes. Elle est située à Griesheim-Pres-Molsheim à environ 30 km de l'écluse de Strasbourg. La plateforme reçoit principalement des déchets du BTP, qu'elle dirige vers la filière des techniques routières. Elle reçoit également des déblais terreux qui font l'objet d'une valorisation agricole. La capacité d'accueil de la plateforme s'élève à 10 000 voire 15 000 tonnes de déchets tous les 6 mois. Les coûts sont aux alentours de 25 €/t, mais peuvent augmenter jusqu'à 50 €/t en fonction de la qualité du matériau et de sa siccité. Ainsi, la déshydratation du déchet peut être effectuée sur site, mais cela coûtera plus cher.

La plateforme n'a jamais reçu de sédiments, mais le responsable technico-commercial Guillaume Laine pense qu'ils pourraient être assimilés aux déblais terreux et ainsi être valorisés en tant que support de culture par la plateforme. Ces derniers seraient ainsi mélangés à du compost ou des déchets verts, avant d'être redistribués à des clients (entreprises paysagères) à proximité (30 km au plus). Néanmoins, du fait de la réglementation en France, le support de culture ne serait pas normé. Les sédiments seraient donc toujours des déchets. La question

de la responsabilité du producteur se pose alors, d'autant plus que le passage par cette plateforme pourrait engendrer une perte de la traçabilité des sédiments.

#### **La plateforme S.A.P.P.E (valorisation agronomique et en béton)**

La plateforme S.A.P.P.E de la société Leonhart est dédiée au traitement des déchets inertes et non inertes. Elle est accessible par barge et est située à 2 km de l'écluse par voie fluviale. La plateforme est en activité depuis 2016 et reçoit des sédiments depuis 2017. Elle a notamment déjà travaillé avec VNF.

La plateforme dispose de bassins de lagunage dans lesquels les sédiments peuvent être déshydratés. Dans le cas où les sédiments sont pollués et non inertes, cela permet également un premier relargage des polluants avant que les sédiments ne soient inertés par un traitement à la chaux. Les bassins peuvent traiter de 3 à 4000 tonnes de sédiments. En cas de surplus, l'utilisation de pompes dans les barges pour évacuer l'eau serait possible. Les sédiments seraient ensuite triés par criblage et hydrocyclonage pour récupérer la fraction sableuse qui serait intégrée dans la fabrication de béton aux Pays-Bas. Selon Lucien Modery, le responsable technico-commercial de la plateforme, les sédiments remplaceraient 30 % de la matière première sableuse du béton et ce dernier serait normé. La fraction plus fine et argileuse des sédiments est récupérée dans les eaux de lavage par le biais de filtres presse. Cette dernière est ensuite dirigée vers des plateformes de compostage en Belgique ou aux Pays-Bas, pour constituer un support de culture (sédiments mélangés à du compost), qui serait lui aussi normé.

Le coût proposé par la plateforme comprend le traitement, le transport et la redirection vers une filière de valorisation. Il est en moyenne à 25-30 €/t, mais varie en fonction des caractéristiques des sédiments (caractère inerte ou non inertes, présence de polluants...) et de la valorisation envisagée. La plateforme peut accueillir 15 à 20 000 tonnes de sédiments par an. L'idéal serait de recevoir 1500 tonnes par mois, mais l'installation peut, au besoin, accueillir jusqu'à 4 à 5000 tonnes de sédiments à un instant t.

#### **Helmbacher ballastières (remblaiement de carrières)**

Helmbacher ballastières est une carrière en eau située à Eschau à 7,3 km de l'écluse de Strasbourg par voie terrestre. La carrière est également accessible par voie fluviale, mais uniquement via le canal du Rhône au Rhin par petites péniches de 230 tonnes. La carrière est actuellement en exploitation, mais ne peut pas être remblayée. En effet, l'administration interdit le remblaiement des carrières en eau en Alsace afin de ne pas toucher à la nappe phréatique du Rhin. La filière remblaiement de carrières est donc écartée pour cette étude de cas. Néanmoins, cette carrière peut recevoir des matériaux à recycler (jusqu'à 100 000 tonnes) pour la production de granulats, qu'elle destine à la filière des techniques routières pour les chantiers de proximité (30 km au plus). A la condition que les sédiments soient suffisamment sableux et très peu argileux, ces derniers pourraient être recueillis dans la carrière où ils seraient criblés pour récupérer uniquement la fraction la plus grossière. En effet, seule la fraction sableuse serait valorisable en granulats : un matériau trop fin présente peu d'intérêt et ne serait donc pas accepté. De même, le coût varie en fonction de la granulométrie du matériau.

#### **ISDI Lingenheld environnement**

L'Installation de Stockage de Déchets Inertes de la société Lingenheld Environnement est située à Oberschaeffolsheim à 21,2 km de l'écluse de Strasbourg. Elle peut stocker 90 000 tonnes de matériaux par an (quantité imposé par l'arrêté préfectoral) à la condition que ces derniers soient inertes et pelletables (siccité à 30 %) selon l'arrêté du 12/12/2014.



**Annexe 6.8 : Annexe liée aux installations de traitements des granulats (FFB – 30 km du site de Vitry-sur-Seine)**

NOM DU CENTRE	ADRESSE	VILLE	DISTANCE	CONTACT COMMERCIAL	TELEPHONE	MAIL	STATUT	AUTORISATION REGLEMENTAIRE	Y	X
LUXO BENNES	37, rue de Seine — 94400 VITRY-SUR-SEINE	VITRY-SUR-SEINE	1,78 km	Mme Rodriguez	01 46 80 34 28	silvinaluxo@hotmail.fr	Public	Arrêté préfectoral N° 2014/6068 du 2 juillet 2014	48,797 37	2,412 656
POINT P ALFORTVILLE	19 Quai de la révolution — 94140 ALFORTVILLE	ALFORTVILLE	3,39 km		01 58 73 88 88	pointp-alfortville@saint-gobain.com	Public		48,783 823	2,420 933
REVIVAL	16 Rue Ernest Renan — 94200 IVRY-SUR-SEINE	IVRY-SUR-SEINE	3,56 km		01 45 21 06 25		Privé	Arrêté préfectoral N° 2014/6069 du 02 juillet 2014	48,806 657	2,399 853
LA PLATEFORME DU BATIMENT IVRY	Route nationale 19-21, rue des Péniches Nationale 19 - 94200 IVRY-SUR-SEINE	IVRY-SUR-SEINE	4,22 km		01 56 20 59 00	nicolas.pageaud@laplateforme.fr	Privé		48,815 398	2,404 764
LA PLATEFORME DU BATIMENT ALFORTVILLE	9 chemin de Villeneuve Saint-Georges — 94140 ALFORTVILLE	ALFORTVILLE	4,26 km	Nicolas PAGEAUD	01 41 79 57 00	nicolas.pageaud@laplateforme.fr		réservé aux clients de la Plateforme munis d'une carte	48,779 63	2,428 734
SEPUR SASU	7 chemin de Villeneuve Saint-Georges — 94140 ALFORTVILLE	ALFORTVILLE	4,42 km	Sandrine RAMASSANY/ Mohamed ELASRI	06 61 02 97 63/06 60 98 12 58	tri.alforville@sepur.com/mohamed.elasri@sepur.com	Privé	Autorisation préfectorale N°2015/3194 du 13 octobre 2015	48,780 739	2,428 881
RABONI IVRY-SUR-SEINE	face au 29 quai Marcel Boyer — 94200 IVRY-SUR-SEINE	IVRY-SUR-SEINE	5,25 km		01 46 70 03 93	ivry@raboni.fr	Privé		48,822 202	2,392 588
BIG BAG 'N GO	quai Marcel Boyer (n°3) — 94200 IVRY-SUR-SEINE	IVRY-SUR-SEINE	5,28 km	Arnaud Rongier	08 10 24 42 24/01 42 29 10 99	contact@bigbagn.go.com		Autorisation préfectorale n°99/3584 du 8/10/1999	48,823 354	2,391 519
POINT P IVRY SUR SEINE VERDUN	113 Avenue de Verdun — 94200 IVRY-SUR-SEINE	IVRY-SUR-SEINE	5,38 km		01 43 90 25 80	pointp-ivryverdun@saint-gobain.com	Public		48,810 908	2,372 408
CEMEX GRANULATS IVRY	3, Quai Marcel Boyer — 94200 IVRY-SUR-SEINE	IVRY-SUR-SEINE	5,53 km	Caroline BIOLLEY/Mat hieu GABORIT	01 49 59 91 52/01 64 11 88 19/06 23 07 43 69	caroline.biolley@cemex.com/mathieu.gaborit@cemex.com	Privé	Autorisation préfectorale n°99/3584 du 8/10/1999	48,824 87	2,389 281
CEMEX GRANULATS TOLBIAC	70, Quai Panhard et Levassor — 75013 PARIS-13E--ARRONDISSEMENT	PARIS-13E--ARRONDISSEMENT	6,45 km	Caroline BIOLLEY/Mat hieu GABORIT	01 49 59 91 52/01 64 11 88 19/06 23 07 43 69	caroline.biolley@cemex.com/mathieu.gaborit@cemex.com	Privé	Arrête préfectoral N° DTPP — 2009 - 178	48,831 865	2,380 503
SITA ILE DE France	43 Rue BRUNESSEAU — 94200 IVRY-SUR-SEINE	IVRY-SUR-SEINE	7,18 km		01 43 90 00 28		Privé	Arrêté préfectoral N° 2014/6599 du 21 aout 2004	48,816 052	2,394 36

Annexes du chapitre 6 : les cas d'étude

PAPREC IDF	21, avenue Pierrefitte — 94290 VILLENEUVE-LE-ROI	VILLENEUVE-LE-ROI	7,23 km		01 49 61 56 56	logistique.idfsud@paprec.com	Privé	Arrêté préfectoral N° 2014/6366 du 28 juillet 2014 Déclaration : autorisation AP 17/07/2001	48,741 63 3	2,420 999
COVED RUNGIS	7, rue de provence — 94150 RUNGIS	RUNGIS	8,27 km		01 46 75 96 47		Privé	Arrêté préfectoral N° 2014/6365 du 28 juillet 2014	48,754 91 8	2,359 147
GENERIS	1, Rue du Four — 94150 RUNGIS	RUNGIS	8,37 km		01 49 79 16 16		Privé	Arrêté préfectoral N° 2015/1774 du 30 juin 2015	48,754 55 1	2,355 464
CEMEX GRANULATS BERCY	1, Quai de Bercy — 75012 PARIS-12E--ARRONDISSEMENT	PARIS-12E--ARRONDISSEMENT	8,63 km	Caroline BIOLLEY/Mathieu GABORIT	01 49 59 91 52/01 64 11 88 19/06 23 07 43 69	caroline.biolley@cemex.com/mathieu.gaborit@cemex.com	Privé	Arrête type N° 2710 Récépissé de déclaration du 18/8/2010	48,896 31 1	- 0,199 044
GENERIS VEOLIA	6, avenue Winston Churchill — 94190 VILLENEUVE-SAINT-GEORGES	VILLENEUVE-SAINT-GEORGES	9,63 km		01 43 89 32 32		Privé	Arrêté préfectoral N° 2013/1449 du 29 avril 2013 Arrêté préfectoral N° 2014/6364 du 28 juillet 2014	48,754 83 5	2,446 369
SITA ILE DE France	Rue des Longs Rideaux — 94450 LIMEIL-BREVANNES	LIMEIL-BREVANNES	9,87 km		01 49 56 21 56		Privé	Arrêté préfectoral N° 2015/4031 du 3 décembre 2015	48,761 23 5	2,471 364
DLB GRANULAT +	D110/Chemin des Bassins — 94450 LIMEIL-BREVANNES	LIMEIL-BREVANNES	10,2 km		01 43 82 59 99	contact-idfn@granulatplus.fr	Privé	AP N° 2003/4994 du 29 décembre 2003	48,748 73 5	2,499 379
LA PLATEFORME DU BATIMENT BONNEUIL	27-29 Avenue du Marechal Leclerc et de sa Division — 94380 BONNEUIL-SUR-MARNE	BONNEUIL-SUR-MARNE	10,79 km		01 46 76 20 00		Privé		48,773 67 6	2,490 284
M-R-B	27 Route de l'Isle Saint Julien — 94380 BONNEUIL-SUR-MARNE	BONNEUIL-SUR-MARNE	10,79 km				Privé	Arrêté préfectoral N°2009/1116 du 26 mars 2009	48,779 95 5	2,487 034
CEMEX SAINT MAUR	Quai du Port de Créteil — 94100 SAINT-MAUR-DES-FOSSES	SAINTE-MAUR-DES-FOSSES	10,89 km	Caroline BIOLLEY/Mathieu GABORIT	01 42 83 31 72/01 64 11 88 02/06 23 07 43 69	caroline.biolley@cemex.com/mathieu.gaborit@cemex.com	Privé	Récépissé de déclaration du 25/3/2010	48,801 97 8	2,469 776
BIG BAG 'N GO	75 quai du port de Créteil — 94100 SAINT-MAUR-DES-FOSSES	SAINTE-MAUR-DES-FOSSES	10,89 km	Arnaud Rongier	08 10 24 42 24/01 42 29 10 99/01 42 29 10 99	contact@bigbagn.go.com	Privé	Récépissé de déclaration du 25/3/2010	48,801 97 8	2,469 776
REVIVAL	3 Route de L'ILE SAINT JULIEN — 94380 BONNEUIL-SUR-MARNE	BONNEUIL-SUR-MARNE	11,34 km		01 58 43 00 90		Privé		48,779 29 9	2,491 08

Annexes du chapitre 6 : les cas d'étude

TAÏS/RECYCLINN PRO	13 Rue Raoul delattre — 94290 VILLENEUVE-LE-ROI	VILLENEUVE-LE-ROI	11,49 km	Daniel PETILAIRE/M axime GAILLARD	01 41 65 91 92/06 24 54 08 50/01 41 65 91 92	daniel.petilaire@veolia.com/maxime.gaillard@veolia.com	Privé	Arrêté n° 2005/292 du 27 janvier 2005	48,734 129	2,440 168
DLB GRANULAT +	41 Route de L'ILE SAINT JULIEN — 94380 BONNEUIL-SUR-MARNE	BONNEUIL-SUR-MARNE	11,78 km		01 43 82 59 99	contact-idfn@granulatplus.fr	Privé	Récépissé de déclaration rubrique 2716 du 21 avril 2016	48,780 043	2,487 36
TAÏS VEOLIA	59 route de l'Ile Saint-Julien — 94380 BONNEUIL-SUR-MARNE	BONNEUIL-SUR-MARNE	11,93 km	Daniel PETILAIRE/AI ain SIMON	01 41 94 17 20/06 24 54 08 50/01 41 94 17 20	daniel.petilaire@veolia.com/alain.simon@veolia.com Arrêté n° 2014/6418 du 30 juillet 2014	Privé		48,780 326	2,484 031
YPREMA BONNEUIL	63-64, route de l'Ile saint julien — 94360 BONNEUIL-SUR-MARNE	BONNEUIL-SUR-MARNE	11,96 km	Stéphanie PAILLUSSON/ Elisabeth	01 49 62 01 23/01 49 62 01 23	siege.idf@yprema.fr/siege.idf@yprema.fr	Privé		48,780 421	2,483 315
MATRIF	Chemin du Port Brun — 91230 MONTLHERY	MONTLHERY	12,42 km	Gaetan Faiderbe	01 69 80 10 80	gaetan.faiderbe@colas-idfn.com/garnier@monthery.screg.fr		Arrêté Prefectoral N° 873062 du 26/10/1987	48,722 897	2,440 883
PAPREC CHANTIERS	Voie des Jumeaux — 91320 WISSOUS	WISSOUS	12,62 km		01 46 86 19 55	bertrand.chellet@paprec.com		Arrêté préfectoral N° 2014.PREF/DRCL/BEPAFI/SSPIL L/702 du 02 octobre 2014	48,738 979	2,337 434

**Annexe 6.9 : Annexe liée aux installations de réaménagement de carrières classiques (Grand Paris – départements limitrophes)**

NOM DE L'EXPLOITANT	VILLE	DEPARTEMENT	LATITUDE	LONGITUDE
Calcaire de la BRIE	Pecy	77	48,655 646	3,077 386
Calcaire de la BRIE	Vaudroyes-en-Brie	77	48,688 026	3,078 792
Piketty	Ecuelles	77	48,336 254	2,790 29
Clamens	Torcy-en-Multien	77	49,042 375	2,961 703
CEMEX Granulats	Pecy	77	48,655 646	3,077 386
CEMEX Granulats	Marolles-sur-Seine	77	48,385 794	3,031 066
Veolia	Claye-Souilly	77	48,944 856	2,686 004
La Farge granulats	Marolles-sur-Seine	77	48,385 794	3,031 066
SCSL	Souppes-sur-Loing	77	48,183 06	2,734 937
Semarvert	Ballancourt	91	48,492 246	2,413 052
Terralta	Bourron Marlotte	77	48,340 452	2,707 153
Fulchiron Industrielle	Milly-la-Forêt	91	48,403 491	2,466 296
Carrières de Jouy-le-chatel	Jouy-le-chatel	77	48,664 598	3,127 641
Gagneraud	Bannost-Villegagnon	77	48,678 004	3,191 511

**Annexe 6.10 : Annexe liée aux installations de réaménagement de carrières de gypse (Grand Paris – départements limitrophes)**

NOM DE L'EXPLOITANT	VILLE	DEPARTEMENT	LATITUDE	LONGITUDE
Siniat	Le Pin-Villevaud	77	48,914 117	2,628 884
ECT	Bernouille	93	48,921 623	2,573 056
ECT	Clichy-sous-Bois	93	48,908 44	2,547 069

**Annexe 6.11 : Annexe liée aux installations de réaménagement de carrières ISDI+ (Grand Paris – départements limitrophes)**

NOM DE L'EXPLOITANT	VILLE	DEPARTEMENT	LATITUDE	LONGITUDE
Cosson	Cregy-les-Meaux	77	48,978 476	2,877 053
ECT	Froges-les-bains	91	48,627 978	2,098 978
Veolia REP	Monthyon	77	49,007 188	2,826 412

**Annexe 6.12 : Annexe liée aux installations de réaménagement de carrières ISDI (Grand Paris – départements limitrophes)**

NOM DE L'EXPLOITANT	VILLE	DEPARTEMENT	LATITUDE	LONGITUDE
CEMEX Granulats	Marolles-sur-Seine	77	48,385 794	3,031 066
Cosson	Cregy-les-Meaux	77	48,978 476	2,877 053
La Farge granulats	Souppes-sur-Loing	77	48,183 06	2,734 937

## Annexe 6.13 : Annexe liée aux granulats de la déconstruction

NOM ET SOURCE	CHANGEMENT CLIMATIQUE (KG CO <sub>2</sub> EQ)				EAU (M <sup>3</sup> )				ENERGIE (MJ)					
	Production	Construction	Utilisation	Fin de vie	Production	Construction	Utilisation	Fin de vie	(1) UTILISATION TOTALE DES RESSOURCES D'ENERGIE PRIMAIRE RENOUELABLE	(2) UTILISATION TOTALE DES RESSOURCES D'ENERGIE PRIMAIRE NON RENOUELABLES	Production	Construction	Utilisation	Fin de vie
USIRF (Union des Syndicats de l'Industrie Routière Française)	25,1	4,11	4,29	0	0,118	0,0137	0,196	0	(1) 6,09 (2) 1470	(1) 0,688 (2) 64,4	(1) 0,51 (2) 2210	(1) 0 (2) 0	Chaussée en enrobé bitumineux à chaud représentative du marché français — 20/01/2016 - 1 min 2 s de chaussée en enrobé bitumineux représentative du marché français — Durée de vie 100 ans — maintenance 13 ans	
Béton armé continu (routier) Base Carbone® V11.2/GES ADEME	200 kg CO <sub>2</sub> e par tonne/202 kg CO <sub>2</sub> e par tonne				-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Béton bitumineux Base Carbone® V11.2/GES ADEME	53 kg CO <sub>2</sub> e par tonne/55 kg CO <sub>2</sub> e par tonne				-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Béton bitumineux à froid Base Carbone® V11.2/GES ADEME	36 kg CO <sub>2</sub> e par tonne/37 kg CO <sub>2</sub> e par tonne				-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Béton bitumineux avec 10 % REC Base Carbone® V11.2/GES ADEME	51 kg CO <sub>2</sub> e par tonne				-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Béton bitumineux avec 20 % REC Base Carbone® V11.2/GES ADEME	44 kg CO <sub>2</sub> e par tonne				-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Béton bitumineux avec 30 % REC Base Carbone® V11.2/GES ADEME	42 kg CO <sub>2</sub> e par tonne				-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Béton bitumineux avec 50 % REC Base	37 kg CO <sub>2</sub> e par tonne				-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Annexes du chapitre 6 : les cas d'étude

NOM ET SOURCE	CHANGEMENT CLIMATIQUE (KG CO <sub>2</sub> EQ)				EAU (M <sup>3</sup> )				ENERGIE (MJ)			
	Production	Construction	Utilisation	Fin de vie	Production	Construction	Utilisation	Fin de vie	(1) UTILISATION TOTALE DES RESSOURCES D'ENERGIE PRIMAIRE RENOUELABLE	(2) UTILISATION TOTALE DES RESSOURCES D'ENERGIE PRIMAIRE NON RENOUELABLES		
Carbone® V11.2/GES ADEME												
OFFICE DES ASPHALTES	9,51	3,27	1,45	1,72	0,044 2	0,008 43	0,005 85	0,005 91	(1) 3,09 (2) 468	(1) 0,341 (2) 60,8	(1) 0,370 (2) 55,5	(1) 0,266 (2) 25,9
	Revêtement en asphalte pour chaussée — Surface de 1 m <sup>2</sup> de chaussée à base d'asphalte, assurant une fonction d'étanchéité, sur la base d'une durée de vie de référence de 30 ans. — Durée de vie 30 ans – maintenance 15 ans											
MEEM — MLHD	31,3				0,325				(1) 19,2 (2) 1140			
	Voirie et revêtements extérieurs en enrobés — Assurer le revêtement et l'étanchéité de chaussée, de trottoir et de parking avec une couche à base d'asphalte de 3,5 cm d'épaisseur pendant une durée de vie de référence de 20 ans. — Durée de vie 20 ans											
MEEM — MLHD	72,7	13,1	0	2,85	0,4	0,041 5	0	0,005 02	(1) 129 (2) 159	(1) 10 (2) 177	(1) 0 (2) 0	(1) 0,105 (2) 40,8
	Dalle ou prédalle en béton cellulaire [ép. 30 cm] — Assurer la fonction de 1 m <sup>2</sup> de dalle en béton cellulaire d'épaisseur 30 cm pour une durée de vie de référence de 100 ans. Durée de vie 100 ans											
Béton — (C25/30CEM II) GES ADEME	88 kg CO <sub>2</sub> e par tonne				-	-	-	-	-	-	-	-
MEEM — MLHD	85	2,38	0	2,59	0,39	0,003 02	0	0,210	(1) 19,4 (2) 667	(1) 0,011 4 (2) 30,8	(1) 0 (2) 0	(1) 7,65 (2) 458
	Dalle ou prédalle en béton non armé [ép. 30 cm] — Assurer la fonction de 1 m <sup>2</sup> de dalle en béton non armé d'épaisseur 30 cm pour une durée de vie de référence de 100 ans. — Durée de vie 100 ans											
SNBPE	165	14,5	0	2,23	0,825	0,037 1	0	0,883	(1) 23,6 (2) 115	(1) 0,812 (2) 170	(1) 0 (2) 0	(1) 0,445 (2) 298
	Gros béton C20/25 X0 CEM II/A —Il s'agit d'un mètre cube de béton de remplissage dont la DVT est de 100 ans.											
SNBPE	189	14,6	-3,0	-0,710	0,868	0,037 6	0	0,019 8	(1) 25,8 (2) 1290	(1) 0,884 (2) 167	(1) 0 (2) 0	(1) 0,445 (2) 297
	Béton pour fondations superficielles C25/30 XC2 CEM II/A - s'agit d'un mètre cube de béton pour fondation superficielle dont la DVT est de 100 ans.											
MEEM — MLHD	283	7,94	0	86,3					(1) 23,6 (2) 115	(1) 0,812 (2) 170	(1) 0 (2) 0	(1) 0,445 (2) 298

Annexes du chapitre 6 : les cas d'étude

NOM ET SOURCE	CHANGEMENT CLIMATIQUE (KG CO <sub>2</sub> EQ)				EAU (M <sup>3</sup> )				ENERGIE (MJ)			
	Production	Construction	Utilisation	Fin de vie	Production	Construction	Utilisation	Fin de vie	(1) UTILISATION TOTALE DES RESSOURCES D'ENERGIE PRIMAIRE RENEVELABLE		(2) UTILISATION TOTALE DES RESSOURCES D'ENERGIE PRIMAIRE NON RENEVELABLES	
	Eléments de fondation en béton préfabriqué - Assurer la fonction de 1 mètre cube de fondation bloc plein en béton préfabriqué pour une durée de vie de référence de 100 ans.											
Nicolas Serres, Sandrine Braymand, Françoise Feugeas	444				780				2140			
	Béton traditionnel — 1 min 3 s de béton — échantillons de béton											
CENTRE D'ETUDES ET DE RECHERCHES DE L'INDUSTRIE DU BÉTON	6,29	9,40	-2,08	1,09	0,971	0,01	0	0,698	(1) 64,9 (2) 2210	(1) 0,0383 (2) 103	(1) 0 (2) 0	(1) 25,5 (2) 298
	Assurer la fonction de coffrage résistant sur 1 m <sup>2</sup> de plancher à poutrelles. Le produit est mis en œuvre selon les règles de l'art. — A Les entrevous participent aux performances techniques du plancher qu'ils constituent : acoustique, performance au feu, thermique — Durée de vie 100 ans											
INDICATEUR D'IMPACT	EAU				RECHAUFFEMENT CLIMATIQUE				ÉNERGIES NON RENEVELABLES			
Valeur	223485,60 L		223497,97 L		106,63 kg CO <sub>2</sub> eq		103,61 kg CO <sub>2</sub> eq		106,67 kg CO <sub>2</sub> eq		520,24 MJ primary	
Méthode de calcul	BEES		Selected LCI results		CML 2/CML 2001		IMPACT 2002+		IPCC (100 ans)		IMPACT 2002+	





# Mickaël BURONFOSSE

## Doctorat : Systèmes SocioTechniques

### Année 2018

#### Conception d'un outil multicritères d'aide à la décision pour la valorisation des déchets industriels

Pour orienter un flux de déchets et faire un choix d'installation de gestion, les décideurs opérationnels doivent intégrer les volets économique, environnemental, territorial, technique et réglementaire. Ces aspects sont rarement traités ensemble et il est difficile de choisir entre différentes installations de valorisation, en se basant sur une analyse complète et élaborée.

Ce travail de thèse consiste en l'élaboration d'un outil comparant, via 23 critères et 42 avis d'experts, des installations de gestion de déchets sur ces 5 dimensions. Pour construire et pondérer les critères entre eux, nous avons adapté une méthode multicritère qui permet, via les avis d'experts, l'agrégation de critères qualitatifs et quantitatifs pour effectuer la comparaison des installations de valorisation.

Plusieurs installations de gestion ont été comparées à travers différents cas d'études sur les déchets amiantés, le bois, les sédiments de barrages hydro-électriques et les gravats issus de la déconstruction. Ces différentes études montrent le large spectre d'applications de l'outil.

Les installations comparées ont souvent des performances variables selon les dimensions et l'outil donne la possibilité aux décideurs opérationnels de choisir une installation en retenant le meilleur compromis entre les cinq aspects étudiés. En effet, selon leur perception du contexte et leur sensibilité, les gestionnaires de déchets peuvent prendre une décision et disposent d'une base argumentaire permettant la discussion avec les différents services internes et externes concernés par la gestion des déchets.

Mots clés : déchets, gestion intégrée – économie circulaire – déchets industriels – décision multicritère.

#### Design of a Multicriteria Decision Support Tool for the Recovery of Industrial Waste

In order to select where a waste stream should go and to choose an appropriate management facility, operational decision makers must integrate economic, environmental, territorial, technical and regulatory aspects. These are seldom dealt with together and it's difficult to choose between different facilities, based on a comprehensive and elaborate analysis.

This thesis consists in the design of a tool in order to compare waste management facilities, based on various criteria which belong to the 5 previous aspects. To build and weigh the set of criteria, we propose to adapt and use a multi-criteria-decision-making method. It allows, via a wide panel of expert opinions (from industry, academia and environmental agencies), the aggregation of qualitative and quantitative criteria to compare waste management solutions.

Many facilities were compared, based on case studies: asbestos waste, wood waste, sediments from hydroelectric dams and recycled concrete from deconstruction. These studies demonstrate the wide application of the tool.

The management facilities which are compared have different levels of performance, which vary according to the dimensions studied. This gives the operational decision makers the possibility to choose the best compromise between the 5 aspects taken into consideration. Indeed, based on their perception of the context and on their own sensitivity, waste managers can make a decision and have a set of informed guidelines which enable a discussion with the various internal and external parties concerned by waste management.

Keywords: integrated solid waste management – circular economy – multiple criteria decision making – factory and trade waste.

Thèse réalisée en partenariat entre :

