



La filière de valorisation des batteries de véhicules électriques en fin de vie : contribution à la modélisation d'un système organisationnel complexe en émergence

Hakim Idjis

► **To cite this version:**

Hakim Idjis. La filière de valorisation des batteries de véhicules électriques en fin de vie : contribution à la modélisation d'un système organisationnel complexe en émergence. Autre. Université Paris-Saclay, 2015. Français. <NNT : 2015SACLC015>. <tel-01243863>

HAL Id: tel-01243863

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01243863>

Submitted on 15 Dec 2015

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.

NNT : 2015SACLC015

THESE DE DOCTORAT
DE L'UNIVERSITE PARIS-SACLAY,
préparée à CentraleSupélec

ÉCOLE DOCTORALE N° 573

Interfaces : approches interdisciplinaires / fondements, applications et innovation

Spécialité de doctorat : Sciences et technologies industrielles

Par

Hakim IDJIS

La filière de valorisation des batteries de véhicules électriques en fin de vie. Contribution à la modélisation d'un système organisationnel complexe en émergence.

Thèse présentée et soutenue à « CentraleSupélec », le « 26/11/2015 » :

Composition du Jury :

M. Dominique MILLET, Professeur, Supméca
M. Jean-Guy DEVEZEAUX DE LAVERGNE, Directeur CEA-I-tésé
M. Eric BONJOUR, Professeur, Université de Lorraine
M. Bernard SAHUT, Docteur, PSA Peugeot Citroën
M. Jean-Claude BOCQUET, Professeur, CentraleSupélec
Mme. Danièle ATTIAS, Professeur, CentraleSupélec
Mme. Sophie RICHET, Ingénieur, PSA Peugeot Citroën

Rapporteur
Rapporteur
Président
Examineur
Directeur de thèse
Co-encadrant
Co-encadrant



Remerciements

Ce travail a été réalisé au sein de PSA Peugeot Citroën, avec l'encadrement scientifique du laboratoire Génie Industriel de CentraleSupélec.

Je souhaite tout d'abord remercier mes nombreux encadrants !!

Jean-Claude Bocquet, ancien directeur du laboratoire et directeur de thèse, pour avoir été présent et assumé la direction de mon travail durant ces trois années de thèse, particulièrement sur les derniers six mois de rédaction.

Danièle Attias, co-encadrante de thèse avec qui cette aventure a commencé et qui continue à me faire confiance en prolongeant ma thèse par un contrat post-doctoral.

Mes vifs remerciements vont également à mes tuteurs industriels chez PSA Peugeot Citroën: Sophie Richet et Elsa Mazzoleni, pour leur confiance, leur disponibilité et leurs conseils. Une mention spéciale à Sophie qui a veillé au bon déroulement académique de ma thèse. .

Merci à tous les quatre pour la qualité scientifique et particulièrement humaine de votre encadrement.

Ce travail a été aussi enrichi dans le cadre de la chaire 'Armand Peugeot', à travers des workshops, des conférences internationales et des échanges avec Yannick Perez, Carole Donada, Marc Petit, Sandrine Delenne et Paul Codani.

Mes sincères remerciements s'adressent à tous les membres du jury, notamment les rapporteurs : Dominique Millet et Jean-Guy Devezeaux de Lavergne.

J'exprime toute ma gratitude aux experts PSA qui m'ont aidé à la compréhension des aspects techniques de ma problématique et dans la collecte des données nécessaires à mes analyses.

Ayant été en thèse Cifre, j'ai eu la chance d'évoluer dans deux environnements exceptionnels. A CentraleSupélec avec tous les doctorants et permanents du LGI. Une mention spéciale pour :

- i) Les anciens thésards qui ont facilité mon intégration au sein du LGI : Liza, Marie-Lise, Sena, Guillaume et Yann.
- ii) Les nouveaux avec qui j'ai partagé tant de moments au laboratoire et en dehors : Karim, Toufik, Hadi, Maxime, Ronay, Denis et Laurie.
- iii) La nouvelle DZ team : Hicham, Amine, Massi et 'Julien'

Et au sein de PSA, j'exprime toute ma reconnaissance à la formidable équipe du service « Projet Environnement » : Julien, Pierre, Laurent, Pascal, Nora et Stéphanie pour l'ambiance conviviale et joyeuse.

J'exprime également ma gratitude à mes deux amis Nassim et Massi pour les nombreux weekends, voyages et parties de PES qui m'ont permis de m'évader du stress de la thèse.

Je ne pourrai pas conclure ces remerciements sans mentionner ma famille. Un grand merci à mes parents et mes trois sœurs pour leurs encouragements, leurs conseils et leur immense soutien.

Table des matières

Remerciements	I
Table des matières	III
Liste des figures	VI
Liste des Tableaux	XI
Liste des abréviations	XV
Introduction générale	1
Chapitre 1 : Contexte	4
1.1 Energie et climat: Le trilemme énergétique.....	4
1.2 Le secteur des transports.....	7
1.3 L'électromobilité.....	10
1.3.1 Caractéristiques de la mobilité actuelle.....	10
1.3.2 Le concept d'électromobilité	11
1.3.3 Histoire et perspectives	14
1.3.4 Freins au développement de l'électromobilité.....	15
1.4 Les batteries pour véhicules électrifiés.....	18
1.4.1 Technologies de stockage pour les VEs	18
1.4.2 Composition des BLIs	19
1.5 Motivations pour la valorisation des BLIs.....	24
1.5.1 Motivations géostratégiques	24
1.5.2 Motivations réglementaires.....	25
1.5.3 Motivations économiques.....	26
1.5.4 Motivations environnementales	27
1.6 Conclusions du chapitre 1.....	28
Chapitre 2 : Problématique, Etat de l'art & Approche	29
2.1 Problématique :	29
2.1.1 Caractéristiques industrielles	29
2.1.2 Positionnement académique	34
2.2 Etat de l'art.....	40
2.2.1 Travaux traitant des filières de valorisation.....	41
2.2.2 Travaux traitant de la valorisation des BLIs.....	44

2.3	Formulation des questions de recherche.....	52
2.4	Approche.....	54
2.4.1	Modélisation de la filière	55
2.4.2	Prospective sur l'évolution de la filière.....	56
2.4.3	Analyse de la gouvernance de la filière.....	56
2.5	Conclusions du chapitre 2.....	57
Chapitre 3 : Modélisation de la filière		59
3.1	Etat de l'art sur la modélisation des systèmes complexes.....	60
3.1.1	La multimethodology	61
3.1.2	La méthode SCOS'M	63
3.1.3	La cartographie cognitive	63
3.1.4	La dynamique des systèmes.....	65
3.1.5	La multimethodology pour la modélisation de la filière	66
3.2	Application à la modélisation de la filière	68
3.2.1	Caractérisation de la filière: Application de SCOS'M.....	68
3.2.2	La compréhension des dynamiques d'évolution de la filière et l'identification des variables clés: Application de la cartographie cognitive et de la DS	78
3.3	Conclusions du chapitre 3.....	90
Chapitre 4 : Prospective sur l'évolution de la filière		92
4.1	Construction des scénarios.....	93
4.1.1	Remplissage de la matrice SRI	96
4.1.2	Présentation des scénarios	100
4.2	Analyse de la criticité géologique des matières	101
4.3	Analyse des procédés de recyclage	106
4.3.1	Rappels sur les technologies BLI et de recyclage.....	107
4.3.2	Taux et revenus de recyclage par procédé.....	108
4.3.3	Coût de recyclage par procédé.....	111
4.3.4	Conclusions de l'analyse des procédés de recyclage	118
4.4	Analyse du reconditionnement.....	119
4.4.1	Rentabilité et marge du reconditionnement	120
4.4.2	Analyse de sensibilité du reconditionnement	122
4.4.3	Conclusions sur l'analyse du reconditionnement.....	124
4.5	Analyse du coût de la fin de vie	125
4.6	Conclusions du chapitre 4.....	128

Chapitre 5 : Analyse de la gouvernance de la filière	130
5.1 Précision du périmètre d'analyse de la gouvernance de la filière	131
5.2 Organisation de la filière sur le périmètre de l'activité de reconditionnement	136
5.2.1 Etat de l'art sur les applications 2 ^{nde} vie	138
5.2.2 Identification de la structure de la filière de reconditionnement « actuelle »	143
5.2.3 Choix des structures potentielles de la filière de reconditionnement	144
5.2.4 Exemple d'illustration	148
5.2.5 Récapitulatif de MadOFR	152
5.3 Conclusions du chapitre 5	154
Conclusion et perspectives	156
Publications et communications	161
Bibliographie :	163
A. Annexes chapitre 1 (Contexte)	174
A.1 Technologies BLI pour VE	174
A.2 Fonctionnement d'une BLI	175
B. Annexes chapitre 3 (Modélisation)	176
B.1 Procédés et opérations élémentaires de recyclage	176
B.2 Flux potentiels entre les sous-systèmes de la filière	178
B.3 Concepts de la dynamique des systèmes (DS)	179
B.3.1 Les diagrammes causaux	179
B.3.2 Les diagrammes stock & flux	180
B.4 Formulation du modèle de simulation	181
B.4.1 Caractérisation des variables exogènes	181
B.4.2 Diagrammes stock & flux et caractérisation des variables endogènes	206
B.5 Test du modèle et Sensibilité des variables incertaines	218
B.5.1 Validation du modèle	218
B.5.2 Graphiques de sensibilité des variables exogènes incertaines	219
C. Annexes chapitre 4 (Prospective)	222
C.1 Analyse des procédés de recyclage	222
C.1.1 Prix de revente des matières recyclées	222
C.1.2 Contribution des opérations élémentaires	224

Liste des figures

Figure 1.1. Emissions CO ₂ par secteur en EU-28 en 2012. Source : (EEA, 2015).....	8
Figure 1.2. Capacité de roulage ZEV en fonction du niveau d'électrification du véhicule. Adapté de (Dugast, 2013).	13
Figure 1.3. Taux de pénétration des VE à l'horizon 2020, selon différentes études (Pasaoglu et al., 2012).....	15
Figure 1.4. Domaines et piliers de l'EC. Source : (ADEME, 2013a)	17
Figure 1.5. Différentes technologies de stockage pour les véhicules électrifiés. Source : (Dugast, 2013).....	19
Figure 1.6. Décomposition et Composition d'une batterie. (Swart et al., 2014; Väyrynen and Salminen, 2012).	20
Figure 1.7. Coût moyen d'un pack EV, cellule LMO/NMC. (Avicenne Energy, 2014)	21
Figure 1.8. Décomposition analytique d'un pack EV.	22
Figure 1.9. Le sujet de la valorisation des BLIs dans son contexte global.	24
Figure 2.1. Options de valorisations possibles pour les BLIs.....	30
Figure 2.2. Filière amont et de valorisation des BLIs.	31
Figure 2.3. Définition de la systémique par le collège français de systémique. Source : (Durand, 2013).....	36
Figure 2.4. Axes de caractérisation d'une filière de valorisation (Maudet-Charbuillet, 2009).	43
Figure 2.5. Combinaison entre les acteurs du réseau et les activités du procédé (El korchi and Millet, 2011).....	44
Figure 2.6 Projets industriels et académiques, en relation avec la valorisation des BLIs. Adaptée et actualisée de (Frost & Sullivan, 2010).....	45
Figure 2.7. Cash-flows pour les trois acteurs (scénario de base). Source : (Hoyer et al., 2014).	47
Figure 2.8. Axes de la filière étudiés dans notre travail, avec des exemples d'interactions entre ces axes.	53
Figure 2.9. Articulation des trois questions de recherche pour répondre à la problématique . .55	
Figure 3.1. Articulation des trois questions de recherche pour répondre à la problématique . .59	

Figure 3.2. Représentation de l'état de l'art pour la modélisation de la filière par une carte cognitive.....	64
Figure 3.3. Etapes de construction d'un modèle DS (Sterman, 2000).....	66
Figure 3.4. Combinaison de SCOS'M avec la cartographie cognitive.....	67
Figure 3.5. Articulation des trois méthodes de modélisation.....	67
Figure 3.6. Limitation du système étudié et sa décomposition initiale en sous-systèmes.....	68
Figure 3.7. Options de valorisations possibles pour les BLIs.....	69
Figure 3.8. Décomposition et Composition d'une batterie. (Swart et al., 2014; Väyrynen and Salminen, 2012).	71
Figure 3.9. Décomposition du sous-système de réutilisation.	71
Figure 3.10. Processus de recyclage possibles. Adapté de (Kwade, 2010; Sangwan and Jindal, 2013).....	72
Figure 3.11. Limitation du système étudié et sa décomposition finale en sous-systèmes.....	74
Figure 3.12. Les phases du cycle de vie de la filière.....	74
Figure 3.13. Décomposition d'un système industriel selon 4 pôles (Perron, 2002).	75
Figure 3.14. Bête à cornes du système pour l'expression du besoin fondamental.....	77
Figure 3.15. Diagramme causal de la rentabilité du recyclage. 'Extrait du modèle DS'	80
Figure 3.16. Diagramme causal de la criticité géologique d'une matière « Z ».	81
Figure 3.17. Vue globale du modèle DS.....	82
Figure 3.18. Décomposition et Composition d'une batterie. (Swart et al., 2014; Väyrynen and Salminen, 2012).	85
Figure 3.19. Sensibilité de la variable endogène « Cumul CBA of P1 » par rapport à la variable exogène « %NMC ».	88
Figure 3.20. Effets des variables clés sur les dynamiques d'évolution.	90
Figure 3.21. Illustration de notre travail par une carte cognitive (questions de recherche, problématique).	91
Figure 4.1. Articulation des trois questions de recherche pour répondre à la problématique.	92
Figure 4.2. Effets des variables clés sur les dynamiques d'évolution.....	95
Figure 4.3. Valeurs de la variable « xEV penetration rate » à travers les différents scénarios.....	97
Figure 4.4. Valeur de la variable « LIB lifetime » à travers les différents scénarios.	98
Figure 4.5. Représentation simplifiée des six scénarios. (BC=Best case, Ex = Expected, WC = Worst case).....	100
Figure 4.6. Diagramme simplifié des variables intervenant dans l'analyse de la criticité géologique des matières.....	102

Figure 4.7. Consommation des réserves de cobalt pour les BLIs EU dans les scénarios S1/S6.	102
Figure 4.8. Diagramme simplifié des variables intervenant dans l'analyse des procédés de recyclage.	106
Figure 4.9. Décomposition et Composition d'une batterie. (Swart et al., 2014; Väyrynen and Salminen, 2012).	107
Figure 4.10. Rappel des deux procédés de recyclage considérés.....	108
Figure 4.11. Taux de recyclage des BLIs NMC.....	108
Figure 4.12. Taux de recyclage des BLIs LFP.....	108
Figure 4.13. Contribution des matières d'une BLI NMC et LFP aux taux et revenus de recyclage dans P1 et P2.	110
Figure 4.14. Contribution des opérations de P1 au taux et revenu de recyclage des BLIs NMC.	111
Figure 4.15. Coût de recyclage et coût de recyclage global	111
Figure 4.16. Rappel des six scénarios analysés. (BC=Best case, Ex = Expected, WC = Worst case).....	112
Figure 4.17. Taux d'utilisation des unités de P1 dans les six scénarios.....	112
Figure 4.18. Evolution du coût de recyclage dans P1 dans les six scénarios.	113
Figure 4.19. Taux d'utilisation des unités de P2 dans les six scénarios.....	113
Figure 4.20. Evolution du coût de recyclage dans P2 dans les six scénarios.	114
Figure 4.21. Valeurs possibles du coût de recyclage à terme dans les deux procédés.....	119
Figure 4.22. Diagramme simplifié des variables intervenant dans l'analyse du reconditionnement.	119
Figure 4.23. Rappel des quatre scénarios analysés.	120
Figure 4.24. Evolution de la marge du reconditionnement dans les quatre scénarios.	120
Figure 4.25. Taux d'utilisation des unités de reconditionnement dans les quatre scénarios. .	121
Figure 4.26. Valeurs possibles de la marge de reconditionnement à terme.....	124
Figure 4.27. Calcul du coût de la fin de vie (global).....	125
Figure 4.28. Valeurs possibles du coût de la fin de vie à terme dans les deux procédés.	126
Figure 4.29. Valeurs possibles du coût de la fin de vie global à terme.....	126
Figure 4.30. Les composantes du coût du cycle de vie global de la BLI.	127
Figure 4.31. Evolution du prix d'une BLI à terme (€/kWh), avec sa valorisation.....	129
Figure 5.1. Articulation des trois questions de recherche pour répondre à la problématique.	130
Figure 5.2. Exemple d'une typologie d'organisation.	132

Figure 5.3. Cadre de la méthode aidant à définir les systèmes éco-innovants. (El korchi, 2010; Tchertchian et al., 2010).....	136
Figure 5.4. Logique de construction et de fonctionnement de MadOFR.	138
Figure 5.5. Performances des parties prenantes sur les quatre critères de succès.....	151
Figure 5.6. Rappel de la logique de construction et de fonctionnement de MadOFR.	153
Figure A.1. Propriétés et avantages de chaque technologie. (Novinsky et al., 2014).....	174
Figure A.2. Feuille de route des batteries automobiles au Japon. Adapté de (Pluchet and Destruel, 2010).....	175
Figure A.3. (a, b, c) : Différentes formes géométriques des cellules. d : charge et décharge d'une cellule. Sources : (Ramoni and Zhang, 2013), (Zeng et al., 2013).....	175
Figure B.1. Processus possibles de recyclage. Adapté de (Kwade, 2010; Sangwan and Jindal, 2013).....	176
Figure B.2. Flux potentiels entre les sous-systèmes de la filière.	178
Figure B.3. Exemple d'un diagramme causal.	179
Figure B.4. Exemple d'un diagramme stock & flux.	180
Figure B.5. Vue globale du modèle DS.....	182
Figure B.6. Estimation du parc automobile européen dans les scénarios ETP.....	183
Figure B.7. Taux de pénétrations des VEs en Europe, en 2020 et 2050. (Pasaoglu et al., 2012)	184
Figure B.8. Taux de pénétrations des VEs et VHRs en Europe.....	186
Figure B.9. Notre estimation de la variable « kg / kWh ».	191
Figure B.10. Rappel des deux procédés de recyclage considérés.	195
Figure B.11. Vue globale du modèle DS.....	206
Figure B.12. Diagramme stock & flux du bloc « EV Market ».	207
Figure B.13. Diagramme stock & flux du bloc « EOL Volumes».....	207
Figure B.14. Diagramme stock & flux du bloc « LIB Technology ».....	209
Figure B.15. Zoom sur le cobalt dans le diagramme stock & flux du bloc « Criticality ».....	210
Figure B.16. Diagrammes stock & flux du bloc « Recycling Technology».....	212
Figure B.17. Diagrammes stock & flux du bloc « CBA of Recycling » concernant le revenu de recyclage.....	213
Figure B.18. Diagramme stock & flux du bloc « CBA of Recycling » concernant la rentabilité.	214
Figure B.19. Diagramme stock & flux du bloc « CBA of Repurposing ».	216
Figure B.20. Sensibilité par rapport à la variable « EU fleet ».	219

Figure B.21. Sensibilité par rapport à la variable « xEV penetration rate ».....	219
Figure B.22. Sensibilité par rapport à la variable « LIB Lifetime ».....	219
Figure B.23. Sensibilité par rapport à la variable « Failure rate ».	219
Figure B.24. Sensibilité par rapport à la variable « 2nd Life LIB Lifetime ».	220
Figure B.25. Sensibilité par rapport à la variable « % 2nd life ».....	220
Figure B.26. Sensibilité par rapport à la variable « % P1».....	220
Figure B.27. Sensibilité par rapport à la variable « % NMC ».	220
Figure B.28. Sensibilité par rapport à la variable « % LIB in HEV ».....	220
Figure B.29. Sensibilité par rapport à la variable «xEV LIB capacity ».....	221
Figure B.30. Sensibilité par rapport à la variable «Other Co demand ».....	221
Figure B.31. Sensibilité par rapport aux variables « Investment cost in process P1 », « Fixed cost in process P1 » et « Variable cost in process P1 ».....	221
Figure B.32. Sensibilité par rapport aux variables « Trans. cost for recycling », « Co price » et «Other Co demand ».....	221
Figure B.33. Sensibilité par rapport aux variables « Investment cost in repurposing », « Fixed cost in repurposing » et « Variable cost in repurposing ».	221
Figure B.34. Sensibilité par rapport aux variables « Trans. cost for repurposing » et « New LIB price ».	221
Figure C.1. Evolution du prix des marchandises depuis 1980 (Conceição and Marone, 2008).	222
Figure C.2. Evolution du prix des métaux depuis 1900 (Chen, 2010).....	223
Figure C.3. Prix du cuivre, nickel et cobalt rapporté à celui de 2010. Source : LME.....	223
Figure C.4. Contribution des opérations du procédé P1 et P2 aux taux de recyclage des BLIs NMC & LFP.....	224
Figure C.5. Contribution des opérations du procédé P1 et P2 aux revenus de recyclage des BLIs NMC & LFP.....	224

Liste des Tableaux

Tableau 1.1. Textes adoptés par la commission européenne, dans le cadre du paquet énergie-climat.	6
Tableau 1.2. Statistiques de l'impact du secteur des transports sur les GES.....	7
Tableau 1.3. Moyens de mobilité en France pour 2010/2030 (ADEME, 2012).....	11
Tableau 1.4. Chimies possibles pour le matériau actif.	20
Tableau 2.1. Récapitulatif de l'approche développée.	57
Tableau 3.1. Etat des lieux des acteurs de recyclage des BLIs.	73
Tableau 3.2. Pôle téléologique du système.	76
Tableau 3.3. Pôle ontologique du système.	76
Tableau 3.4. Pôle génétique du système.	77
Tableau 3.5. Identification des facteurs du système.	80
Tableau 3.6. Ensemble des variables exogènes du modèle DS.	84
Tableau 3.7. Récapitulatif de l'analyse de sensibilité.	89
Tableau 3.8. Classement de l'effet des variables clés.	89
Tableau 4.1. Forme générale d'une matrice SRI 'croisée'.	94
Tableau 4.2. Classement de l'effet des variables clés.	94
Tableau 4.3. Matrice SRI initiale des scénarios.	96
Tableau 4.4. Valeurs de la variable « xEV LIB capacity » à travers les différents scénarios. .	97
Tableau 4.5. Augmentation admissible du coût de recyclage ($\Delta_{\text{coût}}$).	99
Tableau 4.6. Valeurs de la variable « % NMC » à travers les différents scénarios.	99
Tableau 4.7. Valeurs de la variable « Transport cost » à travers les différents scénarios.	99
Tableau 4.8. Première dimension de la Matrice SRI.....	100
Tableau 4.9. Matrice SRI finale des scénarios.	100
Tableau 4.10. Réserves et productions des matières d'une BLI (USGS, 2015, 2014, 2013, 2012, 2011, 2010).....	101
Tableau 4.11. Nombre d'années restantes pour la consommation des réserves.	101
Tableau 4.12. Consommation des réserves matières pour les besoins de l'électromobilité en Europe.....	103
Tableau 4.13. Consommation des réserves matières pour les VEs en Europe et effet de leur recyclage.	103

Tableau 4.14. Consommation globale (BLIs + Autres demandes) des réserves matières.....	104
Tableau 4.15. Production des matières pour les besoins de l'électromobilité en Europe.	105
Tableau 4.16. Décomposition analytique d'une batterie NMC ($\text{LiMnNiCo}_{(0,33)}\text{O}_2$) et LFP ($\text{Li}_1\text{Fe}_1\text{P}_1\text{O}_4$).....	107
Tableau 4.17. Revenus/tonne des BLIs NMC & LFP dans P1 & P2.....	109
Tableau 4.18. Taux et revenus de recyclage des BLIs NMC & LFP dans P1 & P2.....	110
Tableau 4.19. Sensibilité du coût de recyclage dans P1/P2, par rapport au coût variable de recyclage.....	115
Tableau 4.20. Sensibilité du coût de recyclage en 2030 dans P1/P2, par rapport au coût variable de recyclage.....	116
Tableau 4.21. Sensibilité du coût de recyclage dans P1/P2, par rapport au prix de revente des matières recyclées.....	116
Tableau 4.22. Intervalle de diminution du coût de recyclage en fonction du prix de revente des matières recyclées.....	117
Tableau 4.23. Sensibilité du coût de recyclage dans P1/P2, par rapport à la variable « %2 ^{nde} vie ».	117
Tableau 4.24. Revenus de recyclage avec l'évolution de la technologie NMC vers un enrichissement Ni ou Mn.....	118
Tableau 4.25. Sensibilité du coût de recyclage en 2030 dans P1/P2, par rapport à l'évolution des BLIs NMC.....	118
Tableau 4.26. Indicateurs de rentabilité du reconditionnement.....	121
Tableau 4.27. Sensibilité de la rentabilité du reconditionnement par rapport au coût variable.....	122
Tableau 4.28. Sensibilité de la rentabilité du reconditionnement par rapport au coût fixe. ...	123
Tableau 4.29. Prix des BLIs utilisés dans l'analyse de sensibilité.....	123
Tableau 4.30. Sensibilité de la rentabilité du reconditionnement par rapport au prix des BLIs.....	124
Tableau 4.31. Seuils de la perte de rentabilité du reconditionnement.....	124
Tableau 4.32. Coûts des options de valorisation et de la fin de vie (hors transport pour recyclage).....	125
Tableau 4.33. Intervalle des coûts constituant la fin de vie à terme.....	127
Tableau 4.34. Intervalle du coût de recyclage global à terme.....	127
Tableau 4.35. Intervalle de la marge de reconditionnement à terme.....	127
Tableau 4.36. Intervalle du coût de la fin de vie global à terme.....	128

Tableau 5.1. Tableau des combinaisons possibles activités /parties prenantes. (X) exemple de la Figure 5.2.	132
Tableau 5.2. Combinaisons retenues pour la répartition des activités parmi les parties prenantes.	135
Tableau 5.3. Applications 2 nd e vie identifiées.	139
Tableau 5.4. Critères de caractérisation des applications 2 nd e vie identifiées.	141
Tableau 5.5. Caractérisation des applications retenues (notre contribution).	143
Tableau 5.6. Caractérisation des combinaisons (Application 2 nd e vie, partie prenante).	147
Tableau 5.7. Rappel de la caractérisation de l'application : Tours de télécommunication. ...	148
Tableau 5.8. Notation du critère « capacité à investir ».	149
Tableau 5.9. Notation du critère « compétence technique ».	150
Tableau 5.10. Notation du critère « captation des volumes ».	150
Tableau 5.11. Evaluation de la faisabilité des combinaisons (Tours de télécommunication, partie prenante).	151
Tableau 5.12. Agrégation des critères de succès.	152
Tableau B.1. Calcul des écarts entre les ventes estimées et réelles.	184
Tableau B.2. Taux de pénétrations selon les scénarios.	185
Tableau B.3. Hypothèses concernant la durée de vie auto d'une BLI.	186
Tableau B.4. Hypothèses concernant la durée de vie du VE.	187
Tableau B.5. Hypothèses concernant la durée de vie 2 nd e vie d'une BLI.	188
Tableau B.6. % BLI dans les VHYs selon les différentes références.	189
Tableau B.7. Récapitulatif des hypothèses concernant la capacité des BLIs	190
Tableau B.8. Estimation empirique de la variable kg/kWh.	191
Tableau B.9. Proportions des cellules et de la masse active positive dans le pack.	192
Tableau B.10. Proportions des matières dans un pack selon les deux projets.	192
Tableau B.11. Hypothèses du projet LiBRi pour la décomposition des batteries NMC et LFP.	193
Tableau B.12. Notre hypothèse pour la décomposition d'une BLI.	193
Tableau B.13. Proportions des matières composant les masses actives (+) NMC et LFP.	194
Tableau B.14. Décomposition analytique d'une batterie NMC (LiMnNiCo _(0,33) O ₂).	194
Tableau B.15. Décomposition analytique d'une batterie LFP (Li ₁ Fe ₁ P ₁ O ₄).	194
Tableau B.16. Récapitulatif des hypothèses concernant les taux de recyclage en hydrométallurgie.	196
Tableau B.17. Taux de recyclage théoriques dans les deux procédés.	197

Tableau B.18. Productions annuelles des matières contenues dans les BLIs selon l'USGS..	198
Tableau B.19. Estimations des réserves selon l'USGS.	199
Tableau B.20. Valeurs adoptées pour les variables « Z reserves »	199
Tableau B.21. Estimations Lithorec des coûts et capacités du procédé 1. (Hoyer et al., 2014)	200
Tableau B.22. Estimations Lithorec des coûts variables du procédé 1. (Hoyer et al., 2014).	200
Tableau B.23. Nos estimations des coûts et capacités des unités du procédé 1.....	201
Tableau B.24. Récapitulatif de nos hypothèses pour les coûts inhérents à chaque procédé. .	201
Tableau B.25. Prix de revente des matières recyclées en 2010.	202
Tableau B.26. Récapitulatif des hypothèses de coûts de reconditionnement.	203
Tableau B.27. Récapitulatif des hypothèses concernant l'évolution du prix des BLIs.....	205
Tableau B.28. Equations définissant les variables endogènes du bloc « EV Market ».....	207
Tableau B.29. Equations définissant les variables endogènes du bloc « EOL Volumes».	208
Tableau B.30. Equations définissant les variables endogènes du bloc « LIB Technology ». .	210
Tableau B.31. Equations définissant les variables endogènes du bloc « Criticality ».	211
Tableau B.32. Equations définissant les variables endogènes du bloc « Recycling Technology ».....	212
Tableau B.33. Equations définissant les variables endogènes du bloc « CBA of Recycling ».	214
Tableau B.34. Equations définissant les variables endogènes du bloc « CBA of Recycling ».	216
Tableau B.35. Equations définissant les variables endogènes du bloc « CBA of Repurposing ».....	217
Tableau C.1. Prix de revente 'référence' des matières recyclées.....	224

Liste des abréviations

- 2nde vie** : Seconde vie
- AbattReLife** : Automotive Battery Recycling and 2nd Life (projet européen)
- ACEA: Association des constructeurs européens d'automobiles
- ACV : Analyse de cycle de vie
- ADEME : l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
- ADR : Accord for dangerous goods by road
- BC** : Best case
- BLI : Batteries lithium-ion pour véhicule électrique
- BMS : Battery management system (Système de gestion de la batterie)
- CAGR**: Compound annual growth rate
- CO2 : Dioxyde de carbone
- DS** : Dynamique des systèmes
- EC** : Economie circulaire
- ELIBAMA : European Li-Ion Battery Advanced Manufacturing (projet européen)
- EOL: End-of-Life (fin de vie)
- ETP : Energy Technology Perspectives (publication de l'IEA)
- ETP_2DS : Scénario ETP, traduisant une augmentation de la température à 2° en 2050.
- ETP_4DS : Scénario ETP, traduisant une augmentation de la température à 4° en 2050.
- ETP_6DS : Scénario ETP, traduisant une augmentation de la température à 6° en 2050.
- EV : Electric vehicle
- EVI : Initiative sur le véhicule électrique
- Ex : Expected
- EU : Europe
- FCV**: Fuel Cell Vehicle (véhicule hydrogène)
- GES**: Gaz à effet de serre
- HEV** : Hybrid electric vehicle (Véhicule hybride)
- IA-HEV**: Accord sur la mise en œuvre des véhicules hybrides et électriques
- IEA : International Energy Agency (Agence internationale d'énergies)
- JOURNEY**: JOintly Understanding Reflecting and NEgotiating strategy
- LCO**: Batterie lithium, cobalt oxyde
- LFP : Batterie lithium, phosphate de fer
- LIB: Lithium-ion battery
- LithoRec: Recycling of Lithium-Ion Batteries (projet européen)
- LME : London Metal Exchange
- LMO : Batterie lithium, manganèse oxyde
- LNO : Batterie lithium, nickel oxyde
- MadOFR** : Méthodologie d'aide à la décision pour l'Organisation de la Filière de Reconditionnement
- MacPMR : Méthode d'Aide à la Conception de Produits Mécatroniques Remanufacturables
- MSP: Méthodes de structuration des problèmes

NCA : Batterie lithium, nickel, cobalt aluminium
NMC : Batterie lithium, nickel, cobalt, manganèse oxyde
Ni-cd : Batterie nickel, cadmium
Ni-MH : Batterie nickel, métal hydrure
OCDE : l'Organisation de coopération et de développement économique
P1: Procédé de recyclage: Démontage + Traitement mécanique + Hydrométallurgie
P2: Procédé de recyclage : Démontage + Pyrométallurgie + Hydrométallurgie
PE : Polyéthylène
PHEV: Plug-in hybrid electric vehicle (Véhicule hybride rechargeable)
PIB: Produit intérieur brut
PP : Polypropylène
QR : Question de recherche
REP : Responsabilité élargie du producteur
RO : Recherche opérationnelle
SCOS': Systemics for Complex Organisational Systems'
SCOS'M : Systemics for Complex Organisational Systems' Modelling
SODA : Strategic Options Development and Analysis
SRI: Stanford Research Institute
SSM : Soft Systems Methodology
TCO : Coût total de possession
TRI: Taux de rendement interne
UPS : Uninterrupted power supply
USABC: U.S. Advanced Battery Consortium
USGS: U.S. Geological Survey (Organisme américain d'études géologiques)
V2G : Véhicule au réseau
VE: Véhicule électrifié ou véhicule électrique
VHY : Véhicule hybride
VHR : Véhicule hybride rechargeable
VHU : Véhicules hors d'usage
WEO: World Energy Outlook (publication de l'IEA)
WC : Worst case
ZEV : Véhicule à zéro émissions

Introduction générale

Au cours de ce vingt-et-unième siècle, des défis sans précédent se posent pour la préservation de notre planète, c'est notamment le cas de notre modèle énergétique. Ce dernier doit être repensé afin de satisfaire la demande croissante, démocratiser l'usage de l'énergie à travers le monde, le tout en minimisant les impacts environnementaux liés à sa production et à son utilisation. Le secteur des transports dans sa globalité, le transport routier en particulier, impacte fortement notre modèle énergétique de par sa dépendance au pétrole et sa contribution aux émissions de gaz à effet de serre. Le rendre plus écologique est donc une priorité. La technologie de la pile à combustible et les autres technologies prometteuses étant moins matures du point de vue de la technologie et de l'infrastructure, l'industrie s'est tournée vers les **véhicules électriques** (tout électrique, hybride rechargeable et hybride), en utilisant principalement les **batteries lithium-ion (BLI)**.

Les BLIs offrent une meilleure autonomie pour les véhicules électriques (VE), mais elles cristallisent certains freins empêchant leur large diffusion, comme la disponibilité des matières constitutives, le coût de la batterie et son impact sur le bilan environnemental global du VE. Parmi les différentes phases du cycle de vie des batteries, la fin de vie met en exergue ces différentes problématiques : géostratégiques, réglementaires, économiques et environnementales.

Deux principales voies de valorisation des BLIs peuvent être envisagées : le recyclage des matières, obligatoire réglementairement, ou le reconditionnement pour la réutilisation en seconde vie (2nde vie). Du fait de l'évolution de la technologie BLI et des volumes encore très faibles arrivant en fin de vie, ces voies de valorisation restent balbutiantes ou en cours d'industrialisation. Par conséquent, une **filière de valorisation** structurée n'existe pas aujourd'hui. Afin de mesurer l'impact de la fin de vie des BLIs sur les différentes problématiques identifiées, il est nécessaire de définir les critères influençant l'émergence de cette filière de valorisation et sa structuration dans l'avenir. Tous les acteurs de la filière automobile sont concernés par ce sujet qui, dans un avenir proche, sera au centre des préoccupations stratégiques, économiques et technologiques des constructeurs. **Dans ce contexte, notre travail a pour objet l'étude de la filière (en devenir) de valorisation des batteries lithium-ion de véhicules électriques en fin de vie.**

Cette filière de valorisation des BLIs est définie dans notre approche comme un **système sociotechnique, complexe en émergence**. Sa nature sociotechnique intègre des aspects **technico-économiques** et **organisationnels**. Les aspects technico-économiques concernent: les options de valorisation, les procédés de traitement, les investissements nécessaires et les revenus des options de valorisation. Les aspects organisationnels font référence à la gouvernance entre les différentes parties prenantes. La complexité de la filière est présentée à partir de trois sources que nous expliciterons: la présence de **plusieurs parties prenantes**, la présence **d'incertitudes** et la présence **d'interactions, rétroactions et délais** entre les éléments qui animent l'évolution de cette filière. Notre problématique est formulée alors comme suit : **Comment étudier la filière de valorisation des batteries des véhicules électriques d'un point de vue technico-économique, organisationnel et prospectif et ce en tenant compte des différentes complexités?**

Le traitement de notre problématique d'un point de vue académique nécessite d'aborder deux champs de recherche : (i) la maîtrise et le traitement de la complexité par une **approche systémique**, (ii) l'aide à la conception de la filière par une **approche prospective**.

La confrontation de la problématique et de notre positionnement académique à l'état de l'art fait émerger trois questions de recherche :

1. **Comment modéliser la filière de valorisation des BLIs comme un système organisationnel complexe en émergence ?**
2. **Comment faire de la prospective sur la filière de valorisation des BLIs ?**
3. **Comment analyser la gouvernance de la filière de valorisation des BLIs ?**

Dans cette thèse, nous avons identifié et contribué à répondre à ces questions de recherche à travers les cinq chapitres de ce rapport. **Le premier chapitre** présente et étudie précisément les éléments de contexte dressés ci-dessus afin de justifier notre objet de recherche, en décrivant les systèmes qui entourent la filière de valorisation et les systèmes auxquels elle contribue : énergie /climat, secteur des transports, électromobilité et batteries. **Au deuxième chapitre**, nous posons notre problématique et formulons les questions de recherche, après une analyse de la littérature. Pour répondre à ces différentes questions de recherche, nous présentons également l'approche que nous avons choisie, une approche originale multidisciplinaire. Dans cette approche, nous présentons trois analyses pour les trois questions de recherche. Pour chacune d'elles, un chapitre est consacré : chapitre 3 pour la première question de recherche, chapitre 4 pour la deuxième et chapitre 5 pour la troisième.

Dans **le troisième chapitre**, nous nous intéressons à la modélisation de la filière de valorisation des BLIs. Nous mettons ainsi en œuvre d'une manière combinée trois méthodes de modélisation systémiques : **SCOS'M** (*Systemics for Complex Organisational Systems' Modelling*), **la cartographie cognitive** et **la dynamique des systèmes** (DS). Le partitionnement, imbrication et combinaison des méthodes de modélisation sont justifiés par le concept de **la multimethodology**. Les éléments de modélisation établis à ce chapitre seront la base pour renseigner les deux autres questions de recherche : (i) la caractérisation de la filière (parties prenantes, sous-systèmes ...), (ii) la compréhension des dynamiques d'évolution de la filière et l'identification des variables clés dans ces dynamiques.

Dans **le quatrième chapitre**, nous nous intéressons à la prospective sur la filière de valorisation des BLIs. Pour ce faire, nous préconisons l'utilisation de scénarios. Ces derniers sont définis à l'aide de la matrice SRI (*Stranford Research Institute*), en exploitant les variables clés qui interviennent dans les dynamiques d'évolution de la filière. Dans ce chapitre, en lien avec les problématiques identifiées, nous présentons quatre analyses portant respectivement sur : la criticité géologique des matières, les procédés de recyclage, le reconditionnement et le coût de la fin de vie de la BLI. Les résultats de ces analyses nous permettent ainsi d'apporter des éléments de réponses aux motivations de la valorisation (géostratégiques, réglementaires et économiques).

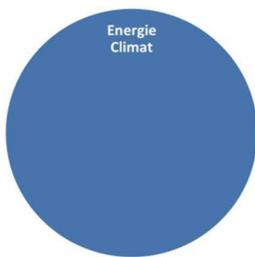
Dans **le cinquième chapitre**, nous nous intéressons à l'étude de la gouvernance de la filière de valorisation des BLIs. Tout d'abord, nous allons restreindre, en le justifiant, le périmètre d'étude à l'activité de reconditionnement pour les applications 2^{nde} vie. Dans ce cas, l'étude de la gouvernance revient à analyser des combinaisons de répartition (application 2^{nde} vie, partie prenante). Ensuite, nous allons développer une méthodologie d'aide à la décision, que nous appelons MadOFR (Méthodologie d'aide à la décision pour l'Organisation de la Filière de Reconditionnement). Cette dernière est inspirée de de la méthode MacPMR (Méthode d'Aide à la Conception de Produits Mécatroniques Remanufacturables). Enfin, un exemple pour l'illustration de l'usage de MadOFR sera présenté.

Dans la conclusion, nous allons synthétiser nos contributions académiques et industrielles et présenter les limites et perspectives de ce travail de recherche.

Chapitre 1 : Contexte

Le travail présenté ici s'intéresse à « La filière de valorisation des batteries de véhicules électriques en fin de vie en Europe », sachant que la batterie est un élément clef d'innovation de rupture d'un système de mobilité, lui-même élément clef du système énergétique. L'aspect systémique nécessite de partir du contexte général (énergie / climat) pour progressivement aboutir à la filière (au système) de valorisation des batteries des véhicules électriques, et ce afin d'ancrer nos modèles dans les incertitudes des systèmes qui l'entourent et des systèmes auxquels elle contribue.

1.1 Energie et climat: Le trilemme énergétique



Depuis quelques décennies, l'enjeu principal de l'énergie réside dans la **sécurité d'approvisionnement** et le prix des ressources (pétrole principalement), en particulier depuis le choc pétrolier de 1973. L'agence internationale d'énergie (IEA), branche autonome de l'Organisation de Coopération et de Développement Economique (OCDE), a été créée en 1974 pour coordonner les politiques énergétiques de ses pays membres, afin de soutenir leur croissance économique. Aujourd'hui, cette vision purement économique permettant de préserver la croissance est remise en cause, d'autres enjeux sont à considérer, notamment le **changement climatique** et **l'accès à l'énergie**. Ces trois éléments : sécurité d'approvisionnement, changement climatique et accès à l'énergie, constituent les trois piliers de l'énergie durable, décrits comme le «**trilemme énergétique**» (WEC, 2013). Nous allons aborder ces trois piliers dans les paragraphes suivants.

La sécurité d'approvisionnement traduit la capacité à répondre d'une manière fiable aux besoins énergétiques actuels et à venir. L'épuisement des ressources fossiles étant inéluctable, il est très important de se tourner vers d'autres sources d'énergie, notamment les énergies renouvelables, ce qui permettra aussi aux pays de produire leur énergie d'une manière domestique et de s'affranchir vis-à-vis des pays producteurs. Cette évolution de l'offre d'énergie s'accompagne d'une adaptation de l'offre des produits. Nous nous intéresserons particulièrement au **secteur des transports**, qui sera développé dans une section à part (1.2). A présent, passons au second pilier de l'énergie durable.

Le **changement climatique**, dont l'une des conséquences est le réchauffement de la planète, est causé par la concentration excédentaire de **Gaz à Effet de Serre (GES)** dans l'atmosphère. Plusieurs gaz rentrent dans la dénomination de GES : Méthane (CH₄), protoxyde d'azote (N₂O), ozone (O₃), les hydro chlorofluorocarbures. Néanmoins, celui qui possède le plus d'impact sur le réchauffement climatique est le **Dioxyde de Carbone (CO₂)**, rejeté dans l'atmosphère suite à l'utilisation massive des énergies fossiles dans les activités humaines. Actuellement, 80% de l'énergie primaire consommée dans le monde provient des ressources fossiles (Salvi et al., 2013).

La prise de conscience des conséquences environnementales des activités humaines, a induit une prise en compte de cette dimension environnementale dans les **politiques énergétiques**. Le protocole de Kyoto en 1997 peut être considéré comme la première initiative politique mondiale dans ce sens, puis d'autres initiatives ont suivi, comme le paquet énergie-climat en Europe. Cette prise de conscience se reflète aussi dans les publications de l'IEA. A travers l'édition 2012 de son rapport « Energy Technology Perspectives » (ETP 2012), l'IEA estime que le niveau des émissions en 2050 doit être réduit à 50% par rapport à celui de 2005, ceci afin de contenir l'augmentation de température à 2° en 2050 (2DS). La transition vers une énergie moins carbonée et plus efficace est devenue le leitmotiv des efforts internationaux de ce siècle.

Le **paquet énergie-climat** européen a été adopté en 2008, afin de mettre en place une politique énergétique européenne commune pour lutter contre le changement climatique. Initialement, il avait comme objectif les « 20, 20, 20 » : 20% d'énergies renouvelables, réduction des émissions CO₂ de 20% et accroissement de l'efficacité énergétique de 20%, le tout en 2020. Il a donné naissance à plusieurs textes législatifs, datés du 23 avril 2009. Ces différents textes sont synthétisés dans le tableau suivant. On retrouve bien les différents leviers pour la mise en œuvre des objectifs « 20, 20, 20 » (stockage de carbone, échange de quotas, normes d'émissions de véhicules particuliers ...etc.).

Texte	Objectif
Directive 2009/29/CE	Amélioration et extension du système communautaire d'échange de quotas d'émission de gaz à effet de serre.
Directive 2009/28/CE	Promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables.
Décision 406/2009/CE	Fixe les efforts de chaque État membre pour réduire leurs émissions de gaz à effet de serre afin de respecter les engagements de la Communauté en matière de réduction de ces émissions jusqu'en 2020.

Directive 2009/31/CE	Relative au stockage géologique du dioxyde de carbone
Règlement 443/2009	Etablissement des normes de performance en matière d'émissions pour les voitures particulières neuves dans le cadre de l'approche intégrée de la Communauté visant à réduire les émissions de CO ₂ des véhicules légers.
Directive 2009/30/CE	Spécifications relatives à l'essence, au carburant diesel et aux gazoles ainsi que l'introduction d'un mécanisme permettant de surveiller et de réduire les émissions de gaz à effet de serre.

Tableau 1.1. Textes adoptés par la commission européenne, dans le cadre du paquet énergie-climat.

Plusieurs textes sont venus enrichir et préciser ces engagements. Ainsi, l'Europe s'est-elle engagée à réduire ses émissions de 20% en 2020 et 80% en 2050 par rapport à 1990 (European Commission, 2011a). Le 23 octobre 2014, les pays membres de l'Union Européenne ont signé un accord historique qui prévoit de réduire de 40% les émissions de gaz à effet de serre en 2030 (par rapport à 1990), ainsi qu'une part de 27% d'énergie renouvelable dans l'énergie consommée.

En ce qui concerne le changement climatique, nous retenons l'aspect urgent et réglementaire de réduction des émissions CO₂, notamment le **règlement 443/2009** qui incite au développement de **véhicules plus écologiques**,

Après avoir abordé les deux premiers enjeux (approvisionnement et changement climatique), passons au dernier enjeu du trilemme énergétique.

La troisième dimension du trilemme énergétique concerne **l'équité sociale et le droit d'accès à l'énergie**. L'énergie est importante pour l'éducation, la santé et le transport. Aujourd'hui, 1,2 milliards de personnes dans le monde sont toujours privées d'accès à l'électricité et 2,8 milliards ne disposent pas d'un mode de cuisson propre (World Bank and IEA, 2013). L'IEA estime que le manque d'accès à l'électricité ou la pauvreté énergétique risque de perdurer dans l'avenir. Entre 0,3 et 0,5 milliards de personnes à l'horizon 2050 (IEA, 2012a, 2012b).

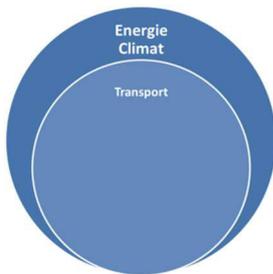
Pour conclure, les enjeux du trilemme énergétique sont les suivants (WEC, 2013):

- Sécurité énergétique : la capacité à fournir l'énergie issue de sources domestiques et étrangères, afin de répondre d'une manière fiable à la demande actuelle et à venir.
- Environnement durable : développement d'une offre d'énergie issue de sources renouvelables ou à faibles émissions de CO₂, amélioration de l'efficacité énergétique.
- Équité énergétique : l'accessibilité, physique et économique, à l'énergie pour toute la population.

En terme de défis, il va falloir satisfaire la demande croissante en énergie primaire, démocratiser l'usage de l'énergie à travers le monde, le tout en minimisant les impacts environnementaux liés à la production et l'utilisation de l'énergie. Ban Ki-Moon, le Secrétaire général des Nations Unies, a déclaré en 2012 à New York que «*L'énergie durable est le fil d'or qui relie la croissance économique, la justice sociale, et un climat et un environnement qui permettent au monde de prospérer*».

Dans ce contexte énergétique général, nous allons analyser le rôle particulier du **secteur des transports**, avec un focus sur l'Europe, d'un point de vue sécurité énergétique, et de réduction des émissions CO₂.

1.2 Le secteur des transports



Le secteur des transports est très énergivore, et **fortement dépendant du pétrole**. Le constat est le même à travers les différentes régions du monde. En chine, Le transport routier a représenté 23,6% de la demande en pétrole en 2010 (Lin and Xie, 2014). En Europe, le secteur des transports a représenté un tiers de la consommation d'énergie finale pour l'année 2012 (European Commission, 2014a), avec une quasi-dépendance aux produits pétroliers. A titre d'exemple, 96% pour la France (ADEME, 2012). La demande en pétrole pour le secteur des transports en EU-27 a augmenté de 26% entre 1990 et 2008, dont plus de la moitié destinée aux véhicules particuliers (Pasaoglu et al., 2012). **Le transport routier** reste le poste de consommation d'énergie prépondérant parmi les autres moyens de transport (Lin and Xie, 2014; Pasaoglu et al., 2012).

Etant donnée la dépendance de ce secteur aux ressources fossiles, on peut facilement déduire la gravité de son effet sur les émissions de GES. Cette conclusion est démontrée à travers les statistiques suivantes :

	Monde	Europe	France
% de GES du secteur des transports / tous les secteurs	14 % (IEA, 2012a)	23% (European Commission, 2014a)	36% (ADEME, 2012)
% du transport routier / secteur des transports	La plus grande part (non estimée)	72% (European Commission, 2014a)	94% (CGDD, 2014)

Tableau 1.2. Statistiques de l'impact du secteur des transports sur les GES

On remarque que le secteur des transports dans sa globalité a un impact non négligeable sur les émissions de GES dans le monde. Cet impact est d'autant plus important dans les pays industrialisés (exemple de l'Europe), où le nombre de véhicules par habitant est plus élevé. De plus, sur l'ensemble des modes de transport utilisés, le transport routier demeure prépondérant.

En EU-28, le secteur des transports est le second contributeur aux émissions CO₂, après le secteur de production d'électricité et de chaleur (Figure 1.1). Dans d'autres pays, comme la France, où la production d'électricité est moins carbonée, le secteur des transports est le premier poste émetteur de CO₂.

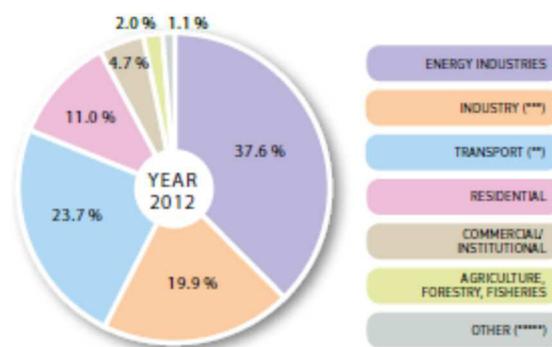


Figure 1.1. Emissions CO₂ par secteur en EU-28 en 2012. Source : (EEA, 2015).

Ainsi, des mesures ont-elles été prises au niveau de l'Union Européenne et au niveau mondial afin de diminuer ces niveaux d'émissions. **Les engagements européens impliquent pour le secteur des transports, une réduction de 60% en 2050, comparée au niveau des émissions en 1990** (European Commission, 2011b). Au niveau des Etats membres, les objectifs diffèrent en fonction de ce qui est défini dans la décision 406/2009/CE et des politiques nationales. A titre d'exemple, la France doit diviser par quatre son niveau d'émission global, comparé à 1990 (1990 : 525 Mt CO₂eq, 2050 : 131Mt CO₂eq). Pour le secteur des transports, une réduction des émissions de 92% s'impose (1990 : 113,3 Mt CO₂eq, 2050 : 8,4 Mt CO₂eq), selon l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) (ADEME, 2012).

Comme évoqué ci-dessus (Tableau 1.1), le **règlement européen No 443/ 2009** a été introduit dans le cadre du paquet énergie-climat. Il a défini les normes d'émissions des nouveaux véhicules légers à hauteur de 130 g de CO₂ par km en 2015 et 95g par km en 2020 (European Commission, 2009), il a été complété en 2014 par le **règlement européen No 333/2014** (European Commission, 2014b). Aujourd'hui, l'objectif de 2015 est atteignable par les

différents constructeurs (EEA, 2015). Cependant, celui de 2020 est un challenge et nécessite des innovations en rupture.

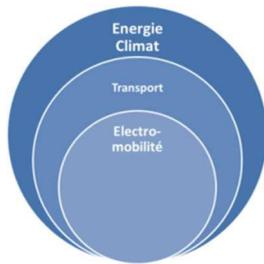
Différents leviers sont possibles afin de respecter ce règlement et ainsi diminuer la dépendance énergétique européenne et ses émissions : amélioration de l'efficacité des moteurs thermiques, baisse de la consommation par l'allègement des véhicules, amélioration de l'aérodynamisme, utilisation des biofuels et électrification des véhicules. **l'électrification progressive des véhicules**, rendue possible par les récents progrès des technologies de stockage, est un levier pertinent pour réduire les émissions de CO₂ à l'usage (McKinsey and Company, 2010). « *Des gains considérables peuvent être atteints par l'amélioration des chaînes de traction actuelles et le déploiement de nouvelles chaînes, principalement électrifiées* » (Pasaoglu et al., 2012), même si des freins rendent difficiles une large diffusion de ces technologies (coût des batteries, infrastructure de recharge, autonomie ...etc.).

L'application de ces leviers pour respecter la réglementation peut être perçue comme source de contraintes ou sources d'opportunités. Sources de contraintes dans le sens où plus de ressources seront nécessaires pour l'étude et l'intégration de ces leviers dans l'industrie automobile. Sources d'opportunités car ils donnent naissance à de nouveaux produits et marchés : « *Les politiques environnementales créent des opportunités d'innovation majeures comme le véhicule électrique* » (Charue-Duboc and Midler, 2011). Néanmoins, il faut préciser que ces innovations sont sujettes à de fortes incertitudes.

En conclusion, nous retenons que notre modèle énergétique doit être repensé afin de mieux répondre aux enjeux de ce siècle, à savoir un accès sécurisé à une énergie plus propre. Le secteur des transports dans sa globalité, le transport routier en particulier, impacte fortement notre modèle énergétique de par sa dépendance au pétrole et sa contribution aux émissions de GES. Le rendre plus écologique est donc une priorité et l'électrification des véhicules reste l'un des leviers pertinents pour y arriver.

Pour ce faire, il convient de partir de notre système de mobilité. Nous allons tout d'abord dresser un état des lieux de notre mobilité actuelle afin de présenter les conditions de son évolution vers le concept d'électromobilité, qui sera ensuite abordé.

1.3 L'électromobilité



Le système de mobilité a des conséquences non négligeables sur le sujet du développement durable. Il est responsable d'une partie conséquente de la consommation d'énergie et de ressources, des émissions de gaz à effet de serre, des émissions de particules fines et de la pollution sonore. De plus, Il permet une meilleure équité sociale en offrant des choix de mobilité accessibles pour différents services (éducation, travail, santé...etc.). Enfin, l'industrie automobile représente des enjeux économiques importants.

Afin de comprendre la mobilité actuelle et son évolution, nous allons dresser un état des lieux de ses caractéristiques.

1.3.1 Caractéristiques de la mobilité actuelle.

La voiture peut être considérée comme un objet de luxe ou un signe de réussite sociale. Cependant aujourd'hui, notre relation au véhicule devient plus rationnelle. La voiture est considérée comme une composante fonctionnelle dans le système de mobilité. 54% des français estiment même que la voiture est avant tout un « **outil fonctionnel de transport** »¹. On passe progressivement d'une logique de possession à une logique d'utilité.

En termes de mode de transports, la suprématie de la voiture individuelle n'est pas encore remise en cause, même si elle est en déclin au profit d'autres modes. Les gens utilisent de plus en plus **des modes de transport alternatifs** : transports en commun, vélos, auto-partage, covoiturage, etc. Ils sont aussi moins réticents à **combinaison plusieurs modes de transport** sur le même trajet.

Les besoins en mobilité ont considérablement augmenté ces dernières décennies en Europe. La mobilité individuelle a doublé entre 1970 et 2005 (CEC, 2006). Le nombre total de kilomètres voyagés a augmenté de 25% entre 1995 et 2008 (European Commission, 2010).

En Europe, 75% des trajets sont accomplis par les véhicules particuliers; le reste par bus, train, transport aérien, maritime ...etc. (Ghersi and McDonnell, 2007). En France, la voiture individuelle reste le moyen de mobilité principal, une tendance qui va baisser au fur et à mesure de l'émergence de modes alternatifs jusqu'à 2030 selon les prévisions de l'ADEME (Tableau 1.3), sans toutefois diminuer le niveau de mobilité global.

¹ Selon un sondage réalisé par Ifop

Flux de voyageurs : 2010 / 2030	Urbain	Périurbain	Longue distance
Véhicules individuels	75 % / 54 %	84 % / 61 %	68 % / 55 %
Covoiturage, autopartage	0 % / 10 %	0 % / 10 %	0 % / 5 %
Transports collectifs (bus, car)	6 % / 10 %	7 % / 10 %	8 % / 10 %
Transports collectifs (fer)	8 % / 10 %	7 % / 10 %	25 % / 30 %
Vélo	4 % / 10 %	1 % / 6 %	0 % / 0 %
Deux-roues motorisés (service)	0 % / 2 %	0 % / 1 %	0 % / 0,1 %
Deux-roues motorisés	6 % / 4 %	1 % / 2 %	0 % / 0,1 %

Tableau 1.3. Moyens de mobilité en France pour 2010/2030 (ADEME, 2012).

En Europe, 50% des trajets sont inférieurs à 10km et 80% sont inférieurs à 25 km (IEA, 2011). Au Royaume-Unis, 97% des trajets sont inférieurs à 80 km (IEA, 2011). Aux USA, 60% des véhicules sont utilisés pour un trajet inférieur à 50 km par jour et 85% pour moins de 100 km (Département du Transport des Etats-Unis). Concernant l'utilisation du véhicule, en France il est inexploité 95% du temps (ADEME, 2012).

Pour synthétiser, la voiture individuelle est une composante fonctionnelle dans un système de mobilité multimodal. Elle reste le moyen de mobilité le plus sollicité. Elle est largement utilisée pour des petites distances (moins de 25 km), pendant un temps marginal de la journée. **Ces caractéristiques constituent un cadre favorable pour l'émergence d'une mobilité plus rationalisée, à savoir l'électromobilité.**

Nous avons mentionné au début de ce chapitre, que notre travail a pour objet la filière de valorisation des batteries des véhicules électriques. Cette dernière étant imbriquée dans plusieurs systèmes, nous abordons maintenant celui de l'électromobilité.

1.3.2 Le concept d'électromobilité

L'électromobilité, une mobilité où le moteur de mobilité est le véhicule électrifié (tout électrique, hybride rechargeable ou hybride), apparaît comme une alternative intéressante pour satisfaire les enjeux du contexte inédit, dressé ci-dessus, à savoir : l'épuisement des ressources fossiles, prise de conscience de la réalité du réchauffement climatique, adoption de politiques de réduction des émissions de CO₂, et caractéristiques de la mobilité actuelle. D'autres facteurs viennent aussi favoriser l'émergence de l'électromobilité, qui sont d'ordre local et sanitaire : « *la lutte contre le bruit en milieu urbain et surtout la réduction des "nouvelles" formes de pollution atmosphérique* » (Pélata et al., 2010).

Selon (Sandén, 2013), l'électromobilité est un système de transport basé sur des véhicules propulsés par l'électricité. L'électricité est produite par le véhicule (hybride) ou stockée depuis le réseau (électrique). De plus, il rajoute « *L'électromobilité est un concept complexe qui impliquera un développement technologique, l'élaboration des politiques, de l'innovation, de nouveaux modèles d'affaires, de nouveaux comportements de conduite et de nouveaux liens entre les industries. Les aspects systémiques de l'électromobilité sont au-delà des simples aspects techniques et le passage à la propulsion électrique doit être compris comme un processus de transformation sociotechnique* » (Sandén, 2013). Ainsi, toute analyse du concept de l'électromobilité doit se faire dans ce cadre de transformation sociotechnique (Attias and Donada, 2012; Dijk et al., 2013; Geels and Schot, 2007).

Même si le véhicule électrique existe depuis un siècle, le véhicule électrique dans le concept de l'électromobilité peut être considéré comme **une innovation radicale**, du point de vue de l'usage et des business modèles (Reiner et al., 2010). « *Le changement majeur opéré est celui de la rupture du système classique de la mobilité qui fait écho à l'apparition de nouvelles conditions technologiques, environnementales, financières et socio-économiques* » (Attias and Donada, 2012).

L'une des conséquences de ce changement est **la redéfinition de la chaîne de valeur automobile**. Selon l'étude réalisée par KPMG's sur le secteur automobile en 2012 (*Global Automotive Executive Survey*), on relève que la chaîne de valeur automobile est en pleine mutation et la bataille pour son contrôle ne fait que commencer. Les fournisseurs de composants électriques acquièrent aujourd'hui un rôle non négligeable et contraignent les constructeurs à des choix difficiles et complexes susceptibles de remettre en cause leur position d'acteurs centraux et dominants dans l'industrie.

En conclusion, les constructeurs doivent s'engager dans le développement de technologies pour l'électromobilité, la connectivité des voitures et les services de mobilité urbaine, le tout dans le cadre de coopérations et alliances. « *Pour satisfaire les nouveaux besoins de mobilité des consommateurs, les constructeurs automobiles doivent se réconcilier avec l'idée d'intégrer la voiture et les services dans le cadre d'un système plus global, au lieu de se concentrer juste sur la fabrication des voitures. Seulement les entreprises qui s'adapteront sciemment vont maintenir leur position dominante sur le marché et continueront de jouer un rôle majeur dans la croissance de l'industrie dans son ensemble* » (Capgemini, 2012)

Il existe plusieurs alternatives technologiques associées à l'électromobilité, en fonction du niveau d'électrification du véhicule:

- **Les véhicules hybrides (VHY) (*Full Hybrid HEV*)** : ils utilisent un moteur à combustion et un moteur électrique, alimenté par une petite batterie (1 kWh- 2 kWh) qui stocke l'électricité générée par le moteur à combustion, ainsi que l'énergie récupérée lors du freinage (IEA, 2011).
- **Les véhicules hybrides rechargeables (VHR) (*Plug-in hybrid electric vehicle PHEV*)** : il s'agit d'un véhicule hybride avec la possibilité de se recharger sur le réseau grâce à une batterie d'une plus grande capacité (5 kWh- 15 kWh). Les VHRs ont une autonomie moyenne en mode électrique de l'ordre de 40 km (IEA, 2011). Un VHR peut utiliser uniquement la batterie, uniquement le moteur thermique ou les deux en combinaison (Soares et al., 2013).
- **Les véhicules électriques (VE) (*Electric vehicle EV*)** : les VEs ont une autonomie moyenne de 150 km (IEA, 2011). Un VE utilise uniquement la batterie (plus de 15 kWh) comme source d'énergie (Soares et al., 2013).

L'un des critères d'appréciation de l'aspect écologique d'un véhicule est le nombre de kilomètres accomplis en mode de roulage ZEV (*Zero emission vehicle*), c'est-à-dire sans émissions polluantes. Bien évidemment, on parle uniquement d'émission du réservoir à la roue (Figure 1.2).

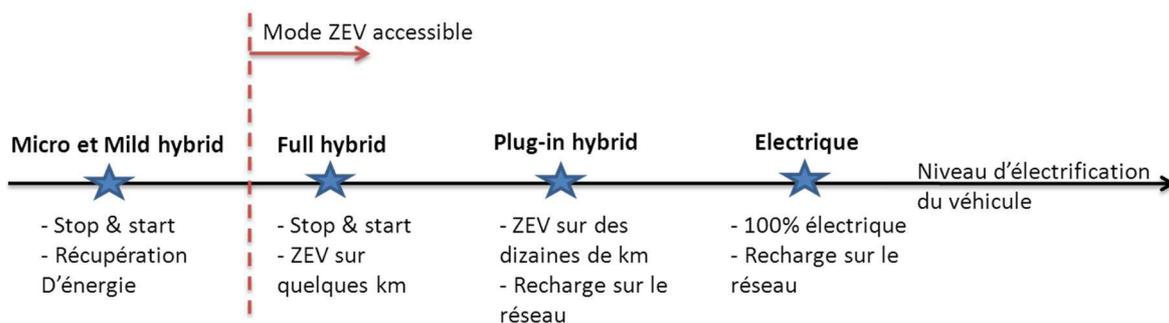


Figure 1.2. Capacité de roulage ZEV en fonction du niveau d'électrification du véhicule. Adapté de (Dugast, 2013).

Nous remarquons que le mode ZEV commence à partir des véhicules « *Full hybrid* », la capacité de roulage en mode ZEV est fortement corrélée avec le degré d'électrification du véhicule.

Comme indiqué ci-dessus, le véhicule électrifié est un élément central dans le concept d'électromobilité. Son histoire et évolution seront explicitées dans la section suivante.

1.3.3 Histoire et prospectives

Le véhicule électrique n'a rien d'une révolution. On parle même de son **troisième âge** (IEA, 2013). Le premier VE a été commercialisé en 1897 à New York. Trois ans après, 28% des véhicules vendus aux USA sont électriques. Cette tendance s'est généralisée au reste du monde jusqu'à atteindre un parc mondial record de 30 000 VEs en 1912. Le succès des VEs a commencé à décliner à partir de l'introduction du moteur à combustion par Ford en 1908 jusqu'à leur effacement dans les années 30. A partir des années soixante, les initiatives VE reviennent régulièrement sans grand succès, c'est ce qu'on appelle le second âge du VE. Aujourd'hui, on peut parler du troisième âge du VE, avec les pouvoirs publics et acteurs privés qui s'impliquent activement pour le développement de la mobilité électrique. En 2011 le parc mondial des VEs culmine à un nouveau record de 50 000 véhicules. En 2012 : 180 000 véhicules et en 2013 : 405 000 véhicules. Cependant, une poignée d'Etats concentre 90% de ce parc (IEA, 2013).

En France, le marché des véhicules électrifiés a représenté 3,1% du marché des véhicules particuliers en 2013. Celui des véhicules tout électriques a représenté 0,59% en 2014, enregistrant une progression de 20% entre 2013 et 2014 (2014 : 10 560, 2013 : 8779 , 2012 : 5663). Celui des véhicules utilitaires électriques a en revanche reculé de 13% entre 2013 et 2014 (2014 : 4502, 2013 : 5175, 2012 : 3651). Une plus grande progression est à reporter pour les hybrides (2013 : 46 785, 2012 : 29 120) (Avere, 2014).

La prospective sur le marché des VEs est un exercice assez difficile. Leur développement étant dépendant de plusieurs paramètres incertains (coût des batteries, disponibilité des infrastructures de recharge, prix du pétrole, comportement des consommateurs ...etc.) (Al-Alawi and Bradley, 2013). La Figure 1.3 illustre la disparité et éventail des estimations possibles. L'ACEA (Association des constructeurs européens d'automobiles) estime qu'une part de marché entre 3% et 10% est réalisable à l'horizon 2020-2025. L'ACEA le conditionne à cinq facteurs de succès : environnement politique, préparation des marchés, standardisation, capacité des technologies et considération de tout le cycle de vie du véhicule (Zetsche, 2010).

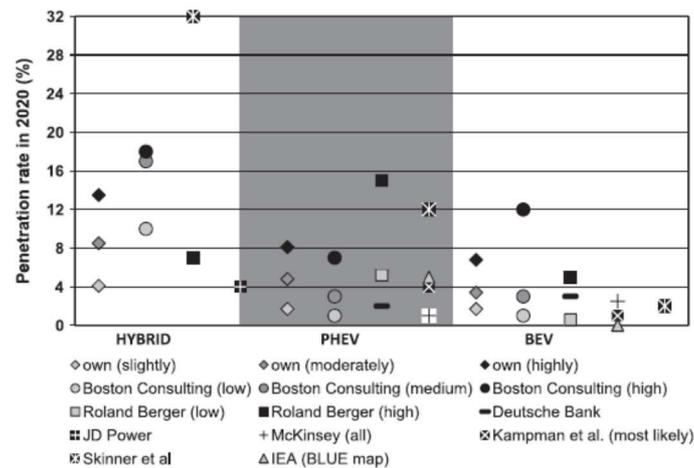


Figure 1.3. Taux de pénétration des VE à l'horizon 2020, selon différentes études (Pasaoglu et al., 2012).

Afin d'initier et d'accompagner le développement du marché du VE, des annonces ont été faites par différents gouvernements. L'EVI (*Electric Vehicle Initiative*) & l'IA-HEV (*Implementing Agreement on Hybrid and Electric Vehicle*), deux organismes rattachés à l'IEA, prévoient et œuvrent pour le déploiement de **20 millions de véhicules tout électriques et rechargeables à travers le monde à l'horizon 2020**.

Aussi disparates que les prévisions puissent être, la progression constante des volumes de ventes actuels, les annonces et politiques incitatives des gouvernements, l'urgence de la situation climatique et sanitaire laissent présager une longévité du troisième âge du véhicule électrique. Cependant, cet optimisme ne devrait pas occulter les **freins** à surmonter afin de faciliter le développement de l'électromobilité. Ces freins font l'objet de la section suivante.

1.3.4 Freins au développement de l'électromobilité

Jusqu'à présent, nous avons défini le concept d'électromobilité et montré son aptitude à satisfaire certains enjeux des sociétés modernes. Cependant, il existe des **freins** qui limitent la large diffusion de ce concept : coût de la batterie qui est une composante principale du coût du VE (30 à 40%), disponibilité des infrastructures de recharge, temps de recharge, autonomie du véhicule, disponibilité des matières premières, bilan CO₂ de la génération d'électricité et de la production du véhicule ...etc. **Bon nombre de ces freins sont directement liés à la technologie de la batterie, d'où la nécessité de s'y intéresser.**

Les constructeurs poursuivent leurs travaux sur l'augmentation de l'autonomie des véhicules, même si nous avons montré que l'autonomie actuelle (150 km en moyennes pour les VE, 40 km pour un VHR en mode électrique) couvre une grande partie des usages. De même, le

problème du **coût et de la disponibilité des matières** nécessitent des stratégies afin de les surmonter et permettre le développement de l'électromobilité.

1.3.4.1 Le coût de la batterie

Afin de baisser le coût des batteries, l'une des voies est la **recherche et développement** sur la technologie de la batterie. Cette direction est bien évidemment importante et contribuera à réduire les prix des batteries. On le voit déjà avec le prix des batteries actuelles comparé aux premières générations (environ la moitié du prix de 2010, qui était à 1000 €/kWh).

En plus du progrès sur la technologie de la batterie, d'autres stratégies complémentaires sont possibles pour diminuer le prix de revient d'une batterie, notamment par **des scénarios d'usage secondaire** (V2G² : vehicle to grid, pendant la durée de vie automobile), **de recyclage** (à la fin de vie automobile) et **de réutilisation**. La réutilisation se décline en réutilisation automobile (**remanufacturing** de la batterie pendant ou à la fin de vie automobile) et en réutilisation secondaire / usage 2^{nde} vie / application 2^{nde} vie (**reconditionnement** de la batterie à la fin de vie automobile).

Ces différentes stratégies agissent sur un coût déjà engagé, en permettant de disposer d'un profit supplémentaire. Ce profit supplémentaire servira à amortir le coût initial de la batterie. Reste à démontrer la faisabilité technique et économique de ces stratégies.

Donc, pour abaisser le coût de la batterie, différentes stratégies peuvent être mises en œuvre pendant la durée de vie automobile, et en fin de vie automobile.

1.3.4.2 La Disponibilité des matières premières

Les moteurs et batteries des VEs sont consommateurs de terres rares et de matériaux stratégiques comme le lithium. Des inquiétudes sont régulièrement exprimées quant à la dépendance, et au potentiel épuisement et conséquences sur l'environnement de l'exploitation de certaines matières premières comme le lithium, le cobalt ou le graphite.

La problématique des matières premières n'est pas propre aux véhicules électriques, elle touche toutes les ressources naturelles, du fait du progrès économique et démographique.

² Le V2G est un concept qui permet l'intégration du VE au réseau électrique intelligent (smart grid), via la recharge intelligente, le stockage, le réglage de fréquence ...etc. Ce concept est en cours d'étude, afin de démontrer sa faisabilité technique et économique (Codani et al., 2014; Kempton et al., 2014).

Plusieurs cadres théoriques et concepts se sont intéressés à la rationalisation de l'utilisation des ressources en garantissant un développement économique: zéro déchet, éco-conception, économie verte, économie circulaire ...etc. Nous estimons que **l'économie circulaire** (EC) possède une vision holistique sur tout le cycle de vie d'un produit. Par conséquent, elle sera brièvement développée dans la section suivante.

Le concept de l'EC a été initialement introduit par deux économistes de l'environnement (Pearce and Turner, 1990). En considérant les problèmes environnementaux et la raréfaction de ressources, Pearce et Turner (1990) considèrent la terre comme un système économique fermé. Ces auteurs ont proposé une circulation en boucle fermée des ressources dans l'économie, ce qui a été appelé « l'économie circulaire ». L'ADEME définit l'EC comme suit : « *L'économie circulaire peut se définir comme un système économique d'échange et de production qui, à tous les stades du cycle de vie des produits (biens et services), vise à augmenter l'efficacité de l'utilisation des ressources et à diminuer l'impact sur l'environnement* » (ADEME, 2013a)

Le terme circulaire est utilisé par opposition au schéma linéaire de l'économie classique : Produire, utiliser, jeter. L'EC a évolué depuis la focalisation sur le recyclage et traitement de déchets à l'efficacité de l'utilisation des ressources le long du cycle de vie des produits. Il s'agit du fameux principe des 3R : **Réduire, Réutiliser et recycler**.

La figure suivante illustre les trois domaines d'actions de l'EC, ainsi que les sept piliers sur lesquels elle repose le long de la boucle.

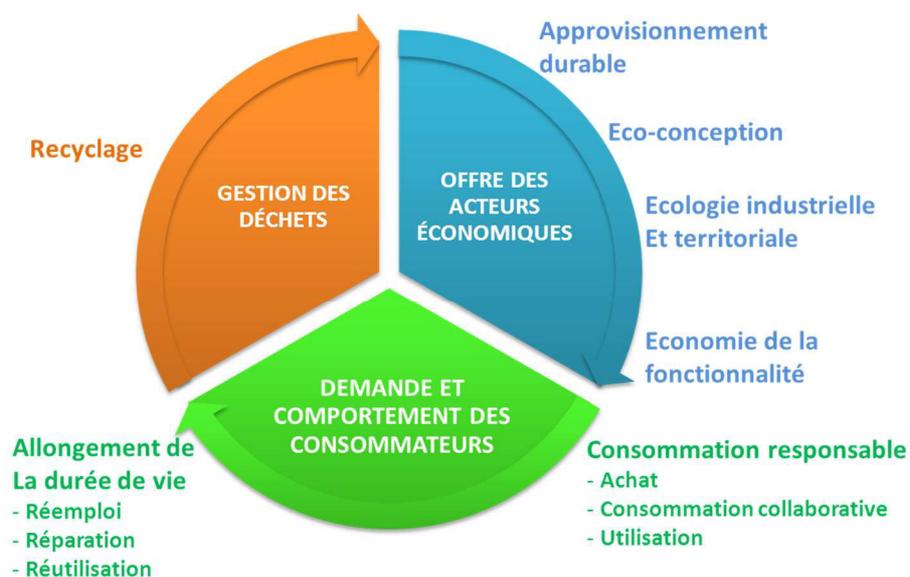


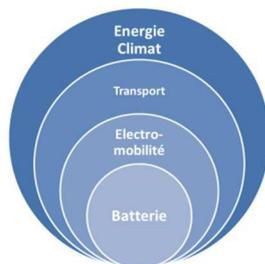
Figure 1.4. Domaines et piliers de l'EC. Source : (ADEME, 2013a)

Ainsi, pour traiter la question des matières premières pour les batteries de véhicules électriques, on peut faire appel à plusieurs stratégies : écoconception, utilisation, réparation, réutilisation, recyclage, etc. Certaines de ces stratégies peuvent être mobilisées avant et pendant la durée de vie automobile, d'autres à la fin de vie automobile.

La batterie cristallise la plupart des freins empêchant la diffusion de l'électromobilité, c'est ce qui nous a motivés à nous y intéresser. Afin de surmonter ces freins, plusieurs stratégies peuvent être déployées le long du cycle de vie de la batterie. La mise en œuvre de ces stratégies nécessite d'abord la compréhension de la technologie des batteries utilisées sur des véhicules électrifiés.

Le système des batteries pour VEs représente le dernier élément de contexte pour aborder le sujet de notre travail, à savoir la valorisation des batteries pour VEs. C'est l'objet de la section suivante.

1.4 Les batteries pour véhicules électrifiés



quelques notions techniques sur les batteries des VEs.

L'étude de la fin de vie des batteries des VEs est l'objet de notre travail. Avant de préciser la problématique, l'exposition d'un background technique est nécessaire. En effet, les solutions de valorisation des batteries en fin de vie sont fortement dépendantes des types de technologies de batteries utilisées. Nous allons donc présenter

1.4.1 Technologies de stockage pour les VEs

Les piles et accumulateurs sont des générateurs électrochimiques utilisés comme source d'énergie principale ou secondaire dans de nombreux appareils ou véhicules. On distingue les piles à usage unique des accumulateurs qui sont rechargeables (ADEME, 2013b). Une batterie est un ensemble d'accumulateurs électriques reliés entre eux pour générer un courant continu (Xerfi, 2014). Exemple : batterie au plomb, nickel cadmium (Ni-cd), nickel métal hydrure (Ni-MH) et les **batteries lithium-ion (BLI)**.

Ainsi, pour les besoins d'électrification des véhicules, plusieurs technologies de batteries sont possibles. Néanmoins, certaines sont plus performantes que d'autres.

Application	Tension	Puissance	Energie	Types de batteries possibles
Thermique / VC	14 V	4 - 7 kW (1 ^{er} démarrage)	< 0,1 kWh	Plomb
Micro Hybride	14 V	3 kW	0,1 – 0,2 kWh	Plomb, NiMH, Lithium
Mild Hybride	42 - 150 V	8-15 kW	0,2 – 0,5 kWh	NiMH, Lithium
Full Hybride	> 200 V	> 30 kW	1 – 1,5 kWh	NiMH, Lithium
Plug-in Hybride	> 200 V	> 30 kW	3 – 10 kWh	Lithium
Electrique	> 200 V	> 30 kW	15 – 30 kWh	Lithium

Figure 1.5. Différentes technologies de stockage pour les véhicules électrifiés. Source : (Dugast, 2013)

Comparées aux autres technologies, les **BLIs** exhibent **plus de densité énergétique, de voltage de cellules, de durée de vie et moins d'effet mémoire** (impact de la recharge de la batterie lorsqu'elle n'est pas complètement déchargée). Quasiment, tous les VEs vendus aujourd'hui utilisent une BLI, c'est le cas aussi des VHRs. Les VHYS continuent d'utiliser des batteries Ni-MH, avec un changement progressif vers 100% de BLIs à l'horizon 2020-2025 (Avicenne Energy, 2013; Richa et al., 2014).

Les batteries post lithium-ion type : lithium-air, lithium sulfure ne sont pas considérées dans ce travail. Elles ne sont pas encore commercialisées, faute de maturité technologique. Aujourd'hui, nous disposons de peu ou pas d'éléments sur ces dernières. Lorsqu'elles seront en service (à partir de 2025), elles arriveront en fin de vie en 2040, sans toutefois remplacer complètement les BLIs (voir annexe A).

Nous concluons que les BLIs représentent la technologie de référence pour les VEs, jusqu'à l'horizon 2025-2030. Dans le cadre de l'électromobilité, elles seront la technologie de référence à valoriser jusqu'à 2040, et au-delà avec les batteries post BLIs.

Nous allons nous intéresser à cette technologie et en présenter les principales caractéristiques physiques et chimiques. **Si ce n'est spécifié, le terme batterie, pack ou BLI signifie une batterie lithium-ion pour VEs.**

1.4.2 Composition des BLIs

Une batterie, ou un pack de batterie est composée de (Figure 1.6):

- La **partie électrochimique** : un ensemble de modules, qui sont composés **principalement de cellules** ;

- La **partie électrique et support** : enveloppe, système de gestion de la batterie (BMS *Battery Management System*), câbles de connexion, un circuit de refroidissement.

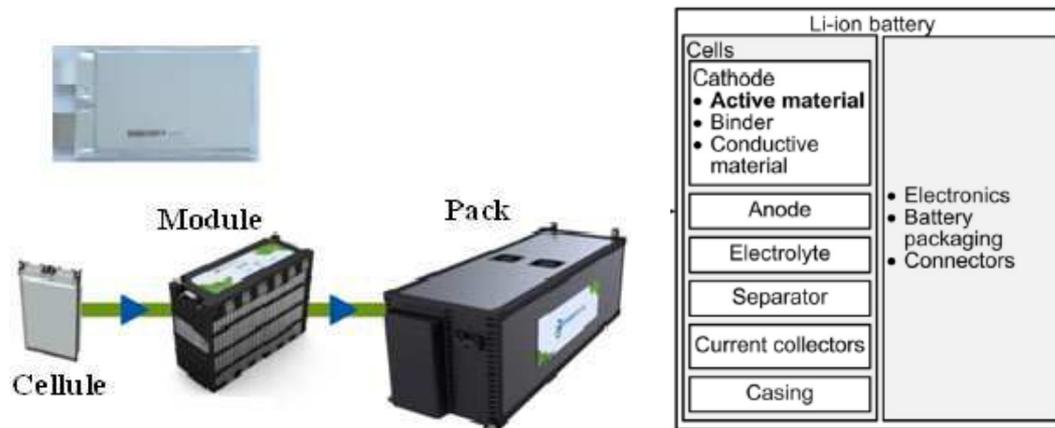


Figure 1.6. Décomposition et Composition d'une batterie. (Swart et al., 2014; Väyrynen and Salminen, 2012).

Donc, le composant élémentaire d'une batterie est la cellule. Une cellule est composée d'une cathode (électrode positive), d'une anode (électrode négative), d'un électrolyte et d'un séparateur (Figure 1.6, annexe A) :

- **La cathode** : composée d'un conducteur en Aluminium, revêtu d'un **matériau actif positif** à l'aide d'un agent liant qui est souvent du fluorure de polyvinylidène (polyvinylidene fluoride : PVDF). Le matériau actif positif est un lithium-métal-oxyde qui définit le nom de la batterie. **Plusieurs chimies sont possibles** (Ramoni and Zhang, 2013), comme le montre le Tableau 1.4.

Appellation	Signification	Formule chimique
LCO	Lithium Cobalt Oxide	LiCoO_2
NCA	Lithium, Nickel, cobalt aluminum	$\text{LiNi}_{0,8}\text{Co}_{0,15}\text{Al}_{0,05}\text{O}_2$
NMC	Lithium Nickel Cobalt Manganese Oxide	$\text{Li}(\text{Ni}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z)\text{O}_2$
LMO	Lithium Manganese Oxide	LiMn_2O_4
LNO	Lithium Nickel Oxide	LiNiO_2
LFP	Lithium Iron Phosphate / Lithium phosphate de fer	LiFePO_4
Lithium polymère ³	lithium vanadium oxide	LiV_2O_3

Tableau 1.4. Chimies possibles pour le matériau actif.

- **L'anode** : composée d'un conducteur en cuivre, revêtu d'un matériau actif négatif à l'aide d'un agent liant en polymère. Concernant le matériau actif de l'anode, il y a

³La dernière technologie contient un électrolyte en gel de polymère (oxyde de polyéthylène ou poly-acrylonitrile) contenant des sels de lithium, contrairement aux batteries li-ion, qui ont un électrolyte liquide

moins de variabilité, le plus utilisé est souvent du graphite (carbone), même si des anodes en titanates de lithium ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$) sont possibles.

- **L'électrolyte** : c'est un liquide organique qui permet le transfert d'ions entre les deux électrodes. Le Lithium hexafluorophosphate (LiPF_6) est de loin le plus utilisé.
- **Le séparateur** : il agit comme élément de sécurité en évitant le contact direct entre les deux électrodes. Souvent fabriqué à base de polyéthylène (PE) or polypropylène (PP). Il a une forme poreuse qui permet la libre circulation des ions entre les deux électrodes.
- Les éléments décrits ci-dessus sont contenus dans l'enveloppe en acier de la cellule,

Chacune de ces technologies (Tableau 1.4) exhibe des bonnes performances sur certains critères et de mauvaises selon d'autres. C'est ce qui explique la difficulté de l'émergence d'une technologie de référence et le panorama de batteries commercialisées actuellement. L'annexe (A) donne un exemple des technologies commercialisées actuellement, il indique les performances de quelques technologies BLI, en termes de coût, durée de vie, sécurité ...etc. Il indique aussi le fonctionnement d'une BLI.

Concernant le coût de la batterie, la figure suivante illustre sa composition (prix des matières de la cellule, fabrication de la cellule et assemblage du pack) et sa future évolution.

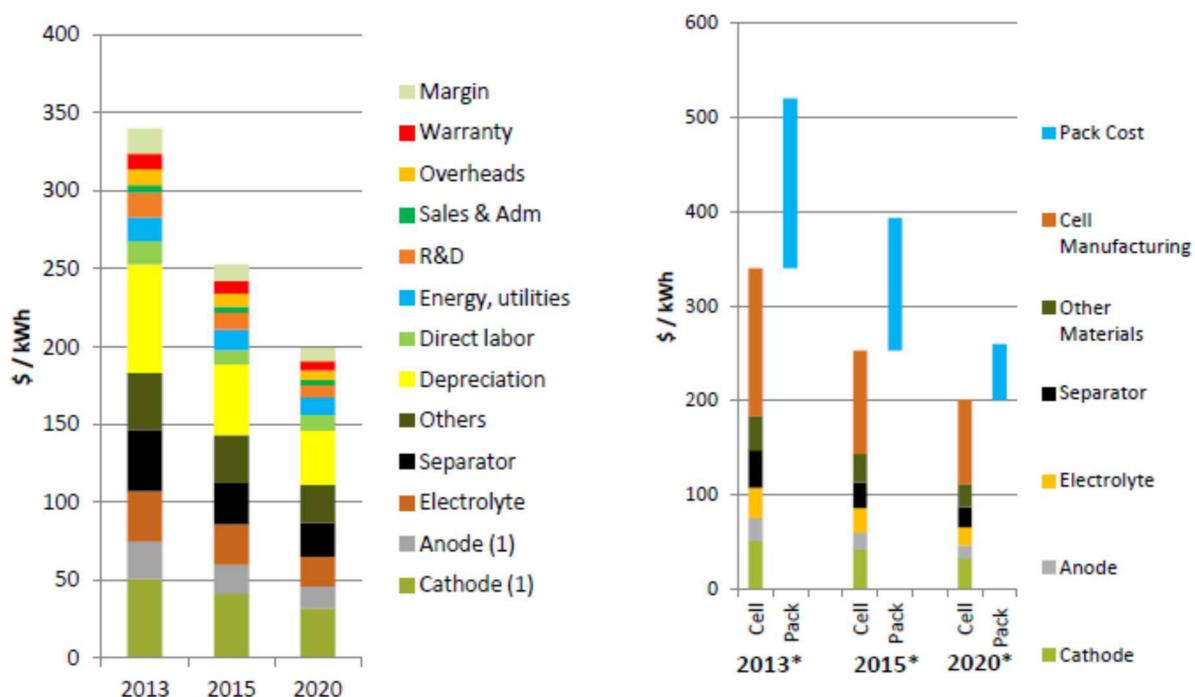


Figure 1.7. Coût moyen d'un pack EV, cellule LMO/NMC. (Avicenne Energy, 2014)

Nous remarquons une diminution importante du coût total du pack dans l'avenir. Cette marge de progression est moins importante au niveau de la cellule. Nous constatons aussi que les matières de la cellule constituent la moitié de son coût, et un tiers de celui du pack. **Nous en déduisons l'importance des stratégies de réutilisation et de recyclage pour éliminer certaines de ces phases de production du pack.**

En termes de composition, la figure suivante illustre les proportions moyennes de ces matières dans la masse d'un pack. Elles se retrouvent dans les éléments suivants:

- Acier et fer: enveloppe de la batterie, des cellules, boulons
- Aluminium et cuivre : conducteurs des électrodes, câbles, cartes électroniques
- Matières plastiques: enveloppe de la batterie, câbles, séparateur
- Graphite : masse active de l'anode
- Lithium : électrolyte et masse active de la cathode
- Cobalt, Nickel, Manganèse, fer...etc : masse active positive de la cathode
- + solvants,

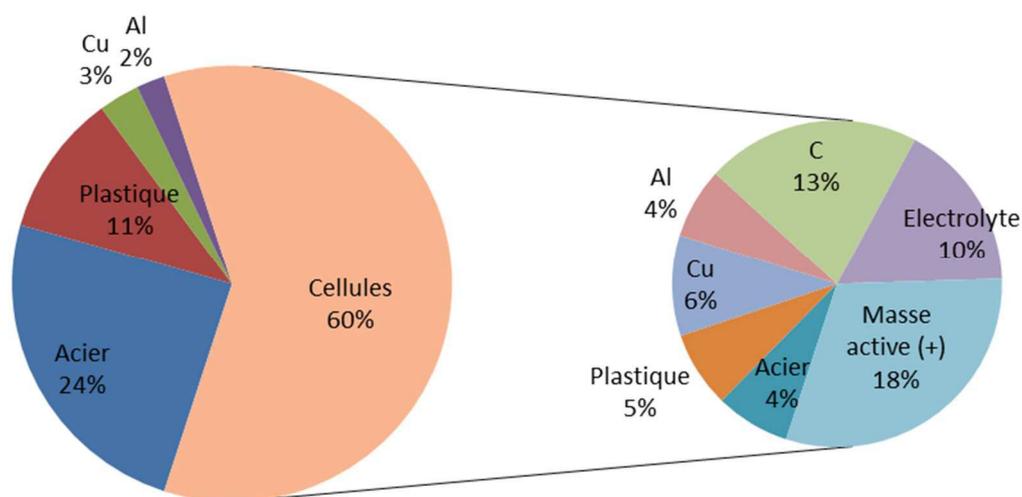


Figure 1.8. Décomposition analytique d'un pack EV.

La partie électrochimique (cellules) représente plus de la moitié de la masse totale d'une batterie. A titre indicatif, les masses des BLIs VE, VHR et VHY sont respectivement de l'ordre de 250 kg, 150 kg et 30 kg.

Les cellules contiennent différentes matières qui peuvent différer selon les technologies BLIs. Pour traiter les BLIs en fin de vie, cela implique le développement de procédés élaborés, capables de traiter la batterie jusqu'au niveau de la cellule. **Par conséquent, le choix des stratégies de valorisation, des procédés et des coûts associés sont primordiaux.**

En synthèse, les batteries lithium-ion seront les plus présentes dans les véhicules électrifiés. Cependant, au sein de cette famille de batteries, il existe plusieurs chimies possibles (NMC, LFP, ..). Une batterie est composée de la partie support et de la partie électrochimique. La cellule est le composant élémentaire de la batterie. Les matières utilisées sont présentes dans des proportions différentes et à des ‘profondeurs’⁴ différentes. Elles ont aussi une contribution différente au coût de la batterie. Cela pose la question du choix de la voie de valorisation et du coût associé.

En conclusion, nous avons mis en évidence les éléments de contexte suivants:

- La prise de conscience des contraintes énergétiques et climatiques, et l’adoption de politiques écologiques, notamment pour le transport.
- L’électrification des véhicules est un levier pertinent pour un transport plus écologique. Cependant, des freins empêchent le développement de cette électromobilité. Bon nombre de ces freins sont liés à la batterie : coût, disponibilité des matières premières.
- La possibilité de mobiliser plusieurs stratégies pour lever ces freins : éco-conception, vehicle to grid, remanufacturing, reconditionnement et recyclage. Certaines de ces stratégies se trouvent dans le périmètre de la fin de vie automobile.
- Une meilleure gestion de cette fin de vie pour l’essor de l’électromobilité et de l’économie circulaire, à travers la prise en compte de la spécificité de la technologies des BLIs et des challenges qu’elles induisent sur leurs valorisations.

Au travers de ces enjeux, nous justifions le choix de concentrer exclusivement notre travail au périmètre de la fin de vie automobile des véhicules électrifiés. La technologie de stockage BLI est la principale dans ces véhicules. Notre travail a pour objet l’étude de la filière de valorisation des batteries lithium-ion de véhicules électriques en fin de vie.

La figure suivante situe la valorisation des BLIs dans ces différents éléments de contexte, elle montre son interaction avec les différents systèmes qui l’entourent et les systèmes auxquels elle contribue.

⁴ Niveau de démontage nécessaire pour récupérer le matériau (pack, module, cellule, matériau actif ?)

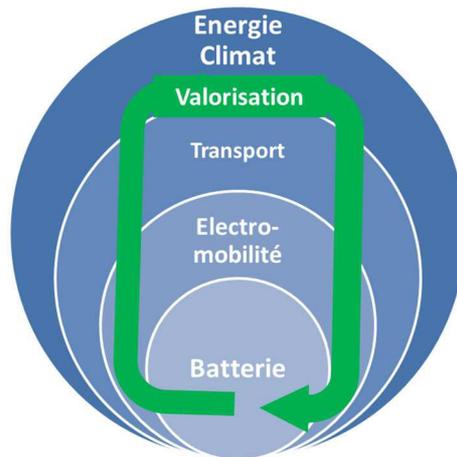


Figure 1.9. Le sujet de la valorisation des BLIs dans son contexte global.

Outre les motivations pour lever les freins limitant le développement de l'électromobilité, il existe d'autres raisons qui nous motivent à nous intéresser à ce sujet. Ces dernières justifient l'intérêt de ce travail d'une part, induisent des contraintes et des considérations supplémentaires d'autre part. Ces différentes motivations sont récapitulées dans la section suivante.

1.5 Motivations pour la valorisation des BLIs

1.5.1 Motivations géostratégiques

Les motivations géostratégiques concernent la maîtrise des approvisionnements en matières potentiellement critiques. Des initiatives, sous l'égide de la commission européenne, ont été lancées pour traiter cette problématique, notamment l'Initiative Matières Premières (IMP) et le Partenariat d'Innovation Européen (PIE) sur les matières premières.

L'IMP (*Raw Materials Initiative*) a été lancée en 2008 afin de formuler une stratégie intégrée en réponse aux difficultés d'accès aux matières non-énergétiques et non-agricoles. Cette initiative a pour objectif de favoriser l'approvisionnement durable en matières premières provenant de sources européennes, améliorer l'efficacité des ressources et promouvoir le recyclage. Une liste de matières critiques est publiée tous les trois ans, où figure notamment le cobalt. De même, Le PIE sur les matières premières (*European Innovation Partnership on Raw Materials*) est une plateforme qui réunit des industriels, les services publics, des universitaires et des ONG. Sa mission est de fournir des conseils de haut niveau sur des approches innovantes pour les défis des matières premières.

En ce qui concerne les BLIs, des inquiétudes peuvent être exprimées quant à la maîtrise de l'approvisionnement des matières comme le cobalt ou le lithium, comme le montre les paragraphes suivants.

Selon l'USGS (U.S. Geological Survey), 85% de la production mondiale de cobalt et lithium provient de 7 pays uniquement (USGS, 2010). Parmi ces derniers, sont présents des pays d'Amérique latine et d'Afrique subsaharienne, avec des régimes politiques instables. Ainsi, la première inquiétude est-elle la dépendance vis-à-vis des pays producteurs.

La deuxième inquiétude concerne la disponibilité physique des ressources, même si pour le lithium, la problématique de sa disponibilité semble être résolue. De nombreuses études démontrent qu'il y a assez de réserves (ressources économiquement exploitables) pour les scénarios de vente de VEs les plus optimistes (Grosjean et al., 2012; Gruber et al., 2011).

Enfin, la troisième inquiétude concerne la capacité des pays producteurs à satisfaire la demande dans les années à venir, même lorsque les réserves sont suffisantes. Sachant qu'il faut entre 5 à 10 ans pour qu'une nouvelle mine devienne exploitable (Miedema and Moll, 2013; Novinsky et al., 2014), on peut en déduire facilement le rôle primordial du recyclage pour pallier ces problématiques.

1.5.2 Motivations réglementaires

La directive 2000/53/CE, directive véhicules hors d'usage (VHU), fixe les exigences relatives au traitement des véhicules hors d'usage en Europe. Cette directive définit notamment un objectif de recyclabilité et valorisabilité pour tous les véhicules homologués depuis le 1^{er} décembre 2008. Elle fixe aussi des objectifs de valorisation à l'ensemble de la filière de traitement des VHU, soit un taux de recyclage effectif de 85% de recyclage/réemploi et de 95% de recyclage/valorisation et ceux dès le 1^{er} janvier 2015.

De plus, **la directive 2006/66/CE**, directive piles et batteries, fixe le cadre réglementaire pour le traitement des piles et accumulateurs en Europe. Cette directive distingue : les piles ou accumulateurs portables, les piles ou accumulateurs automobiles, les piles ou accumulateurs industriels. Les BLIs sont considérées comme des accumulateurs industriels.

A l'instar des autres directives européennes sur le traitement des déchets, la directive 2006/66/CE introduit la notion de la responsabilité élargie du producteur (REP). Cette dernière traduit la responsabilité légale d'un acteur industriel pour satisfaire les exigences de

la directive. La REP est aussi imposée aux piles et accumulateurs industriels : « *Les producteurs (et non plus les détenteurs) doivent donc gérer la fin de vie des piles et accumulateurs qu'ils ont mis sur le marché national* » (ADEME, 2009).

Cette directive impose pour les batteries des véhicules électriques:

- la mise en place d'un système de collecte dédié, sans frais pour l'utilisateur final ;
- la mise en place d'un système de traitement, recyclage et élimination des déchets de piles et accumulateurs.
- L'Obligation de recycler au minimum **50%** du poids de la batterie.

A notre connaissance, le contexte européen est le plus contraignant. Même s'il existe des réglementations dans le reste du monde, notamment au Japon sur les VHU, celle concernant les batteries est unique au monde.

1.5.3 Motivations économiques

La durée de vie automobile d'une batterie varie entre 10 et 15 ans selon les estimations (Gruber et al., 2011; Pollet et al., 2012; Richa et al., 2014; USABC, 2015). Cette durée de vie correspond à une dégradation de la capacité de la batterie, qui devient non optimale pour les besoins du véhicule. On juge qu'une batterie sera remplacée ou arrivera en fin de vie du VE, lorsqu'elle est à 70%-80% de sa capacité initiale (ADEME, 2011; USABC, 2015).

Le coût initial d'un VE est supérieur à celui d'un thermique. Lorsqu'on raisonne en coût total de possession (TCO : Total Cost of Ownership), il est possible de démontrer que le VE est plus compétitif, mais les consommateurs sont plus sensibles à l'investissement initial du véhicule. C'est l'une des raisons du succès timide des VEs, ce dernier sera plus compétitif lorsque des baisses significatives sur le coût de la batterie seront réalisées. La batterie, étant une composante principale du coût du véhicule (jusqu'à 40%), des stratégies de réutilisation et de recyclage pourraient abaisser ce coût initial.

Ces batteries, lorsqu'elles sont hors d'usage pour une propulsion automobile optimale, pourraient être exploitées comme réservoirs d'énergie pour d'autres applications embarquées ou stationnaires en fonction de leur viabilité technique, économique et environnementale. Parmi les débouchés possibles, l'utilisation dans des voitures exploitées sur de plus courtes distances est envisagée, de même que le stockage stationnaire d'énergie (ADEME, 2011).

1.5.4 Motivations environnementales

D'un point de vue environnemental, la batterie représente un impact non négligeable sur l'ensemble du Cycle de Vie du véhicule, induit principalement par la phase d'extraction des matériaux nécessaires à la fabrication de la batterie (Gaines, 2012; Notter et al., 2010).

Les conclusions principales des travaux de *l'Argonne National Laboratory* aux USA obtenues au travers de l'analyse ACV (Analyse de Cycle de Vie) des batteries Li-ion sont les suivantes (Dunn et al., 2012; Gaines, 2012; Gaines et al., 2011):

- Le recyclage est moins consommateur en énergie et moins émetteur d'émissions, spécialement pour le CO₂ et SO_x, comparé à la production de batteries à base de matières premières.
- Plus il y a de matériaux recyclés, plus la consommation d'énergie utilisée pour la fabrication de la batterie diminue.

Pour récapituler, les quatre motivations incitant à réaliser la valorisation des batteries des véhicules électriques, sont résumées comme suit :

- **Géostratégique** : S'assurer de la disponibilité des matériaux nécessaires à la fabrication des batteries, notamment le cobalt et le lithium.
- **Réglementaire** : une obligation pour le producteur de s'assurer de la collecte et recyclage des batteries de ses produits, aux taux inscrits dans le droit européen.
- **Economique** : possibilité de réduire le coût global des batteries par des scénarios de réutilisation/recyclage.
- **Environnemental** : Pour la réduction de l'impact environnemental du véhicule, via les bons procédés de recyclage. Ce qui permet d'éliminer une partie des impacts environnementaux de la phase d'extraction de matières premières. Bien évidemment, cela est valable dans un schéma en boucle fermée, où les matières recyclées servent à la fabrication de nouvelles batteries.

1.6 Conclusions du chapitre 1

Dans ce chapitre, nous avons soulevé quelques **enjeux** de nos sociétés modernes, à savoir : l'épuisement des ressources fossiles, la prise de conscience de la réalité du réchauffement climatique et l'adoption de politiques de réduction des émissions de CO₂, pollution locale...etc. Nous avons montré que **l'électromobilité** apparaît comme une bonne alternative pour satisfaire ces enjeux. Cependant, des **freins** empêchent la large diffusion de ce concept.

Parmi ces freins : le coût du véhicule électrifié et la disponibilité des matières premières, qui sont en grande partie liés à la batterie. Nous concluons que la **batterie** est l'élément technologique central accompagnant l'électrification et que sa valorisation en fin de vie est un levier important pour lever les freins au déploiement de l'électromobilité. **La valorisation des batteries lithium-ion des véhicules électrifiés est le cœur dans notre travail de recherche.**

Etant donné l'augmentation de l'utilisation des BLIs dans les applications électroniques, le décollage du marché des VEs, de grandes quantités de BLIs arriveront en fin de vie durant les années à venir, ce qui pose la question de leur valorisation et la mise en place de la filière correspondante. Cette filière de valorisation sera implémentée pour des impératifs législatifs, des motivations économiques, géostratégiques et environnementales.

L'ensemble de ces éléments représente les raisons d'être ou les **finalités** de la filière de valorisation. Ces finalités permettent d'identifier les parties prenantes de cette dernière et le périmètre à étudier. C'est ce qui justifie la description de l'environnement de la filière afin de permettre son étude globale, en considérant l'ensemble des parties prenantes.

Cependant, l'évolution de la technologie de la batterie, des procédés de valorisation, de l'environnement de la filière (marché des VEs, consommation des matériaux, etc.), rendent difficile l'étude de cette filière. Ce contexte d'étude sera mieux précisé au chapitre suivant.

Le chapitre suivant sera consacré à la formulation de notre **problématique de recherche**. Un état de l'art sur la valorisation des batteries li-ion des véhicules électriques sera exposé et discuté. Sur cette base, nos questions de recherche seront précisées et notre approche pour y répondre sera présentée.

Chapitre 2 : Problématique, Etat de l'art & Approche

Ce travail de recherche ; qui a pour titre : « *La filière de valorisation des batteries des véhicules électriques en fin de vie. Contribution à la modélisation d'un système organisationnel complexe en émergence* », a été effectué dans le cadre de la chaire de recherche « Armand Peugeot », en collaboration entre PSA Peugeot Citroën et le laboratoire de Génie Industriel de l'Ecole Centrale Paris.

La chaire « Armand Peugeot » est un partenariat entre trois Ecoles (Centrale-Supélec et l'Essec) qui a été mis en place pour produire de la recherche prospective en croisant les sciences de l'ingénieur, les sciences économiques, les sciences de gestion et les sciences sociales pour aborder la complexité des questions posées par le futur de l'industrie automobile, dans un contexte de développement de l'électromobilité. Ainsi, notre travail de recherche est défini pour répondre à des aspirations industrielles et académiques.

Au début de ce chapitre, nous allons décrire les caractéristiques industrielles de la filière de valorisation des batteries lithium-ion (BLI) des véhicules électriques et clarifier notre positionnement académique. Puis un état de l'art sera présenté et analysé à la section subséquente. Ce qui nous permettra de formuler nos questions de recherche et de construire notre approche pour y répondre aux sections 3 & 4.

2.1 Problématique :

2.1.1 Caractéristiques industrielles

Dans ce travail, nous nous intéressons à la filière⁵ de valorisation des BLIs. Une filière⁵ de valorisation est un enchaînement d'activités, qui se traduit par l'imbrication de chaînes de valeurs, de produits et de productions.

Les filières de valorisation des produits en fin de vie se différencient des autres filières industrielles, notamment de par l'origine de leurs créations. Dans un certain nombre de cas, ces filières sont initialement créées pour satisfaire l'objectif de l'acteur soumis à la réglementation (les constructeurs automobiles sont responsables de la fin de vie des batteries), ce qui entraîne de nouveaux marchés tant pour les acteurs de valorisation que pour les

⁵ Nous avons adopté ce terme, mais Il existe d'autres termes pour faire référence à une chaîne entière d'activités : chaîne des produits (commodity chain), réseau de valeur (value network), réseau de production (production network) (Sturgeon, 2001).

produits valorisés. Par conséquent, il manque un objectif commun entre les acteurs de la filière (De Brito et al., 2003). « Cette vision des filières, et de leurs origines, explique les difficultés des différents acteurs des réseaux à projeter des systèmes économiquement viables et à s'organiser sans intervention financière extérieure » (Maudet-Charbuillet, 2009).

Khan et al.(2012) identifient les acteurs suivants, lorsqu'il s'agit de la valorisation des produits en fin de vie :

- Des acteurs de la chaîne amont ;
- Des spécialistes de la logistique inverse ;
- Des entités gouvernementales ;
- Des acteurs opportunistes.

En termes d'options de valorisation, (Agrawal et al., 2015; Srivastava, 2008) identifient des options de valorisation mineures (réparation, remise à neuf) et majeures (remanufacturing et recyclage). Les options mineures réinjectent le produit dans la chaîne amont à sa phase de distribution. Ces options peuvent être valables pour les produits de grande consommation, mais pas pour un produit complexe comme les BLIs. En plus de la valorisation du produit dans sa chaîne amont, les BLIs peuvent l'être en dehors de cette dernière, dans le cadre d'un reconditionnement pour l'usage en 2nde vie.

Ainsi, nous avons distingué trois options de valorisation (remanufacturing / reconditionnement / recyclage) que nous avons regroupées en deux scénarios de valorisation : La réutilisation et le recyclage. La réutilisation se décline en deux options de valorisation : le remanufacturing et le reconditionnement⁶. Chacune de ces options (remanufacturing / reconditionnement / recyclage) se présente avec plusieurs procédés technologiques possibles.

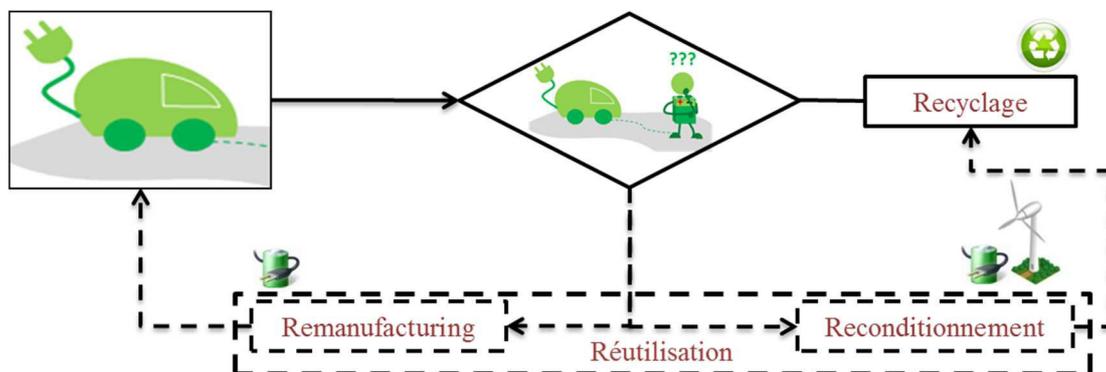


Figure 2.1. Options de valorisations possibles pour les BLIs

⁶ Ces deux options sont davantage clarifiées et discutées à la section (3.2.1.1.1.1).

La partie réutilisation (remanufacturing / reconditionnement) a été représentée par des pointillés, sa concrétisation n'étant pas une certitude, contrairement au recyclage qui sera mis en place pour répondre aux impératifs réglementaires.

En partant de ces options de valorisation et des acteurs identifiés ci-dessus, nous représentons d'une manière générique la filière de valorisation des BLIs (en bas de la figure) et son interaction avec la filière amont (en haut de la figure).

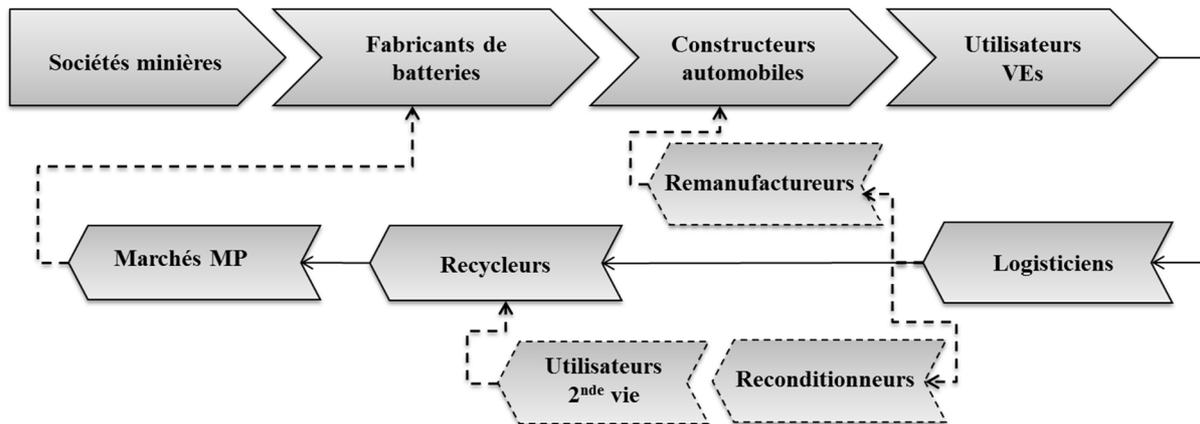


Figure 2.2. Filière amont et de valorisation des BLIs.

La filière de valorisation des BLIs apparaît comme une succession d'une **multitude d'activités**, entreprises par une **multitude d'acteurs**, au service d'une **multitude de secteurs**, pour créer une **multitude de valeurs**.

Cette multitude de secteurs et d'acteurs est synonyme de **multitude de perspectives et d'attentes** sur cette filière de valorisation, c'est ce qui la rend **complexe** à étudier. Ces acteurs interviennent à travers les différentes strates du contexte dressé en chapitre 1 (batterie, électromobilité, énergie, matières premières, etc.).

De plus, La filière amont est plus complexe. A titre d'exemple, l'activité de la fabrication de la batterie peut être divisée en fabrication des composants, cellules, modules, et assemblage en pack, avec des acteurs différents, situés dans des zones géographiques différentes. On peut aussi avoir plusieurs niveaux d'intégration des activités par les acteurs (Fournier et al., 2012).

Trois caractéristiques majeures ont été identifiées tant sur le plan académique (comme le montrera l'état de l'art), que sur le plan du contexte industriel.

Ainsi, **la première caractéristique** de cette filière réside dans le fait qu'elle soit en émergence (en création, en conception). Certains maillons comme le recyclage sont en phase d'industrialisation, d'autres comme la réutilisation sont en phase d'étude.

Contrairement à l'étude d'un objet (ici la filière) déjà existant, **notre recherche doit être menée dans une perspective de prospective pour l'aide à la conception, à la mise en œuvre et au déploiement de cette filière**. C'est ce que nous verrons dans la section suivante.

La **deuxième caractéristique** a été brièvement évoquée ci-avant. Il s'agit de la **complexité** qui est causée par plusieurs sources. Trois sources de complexité ont été identifiées. La **première source** de complexité résulte de la présence de **plusieurs parties prenantes**, avec des cultures industrielles, stratégies et attentes différentes. Ces parties prenantes ont leurs propres objectifs (technique, économique, environnemental...), par conséquent, ces parties prenantes **s'organisent** de différentes manières autour de leurs activités propres, au mieux en tenant compte de contraintes amont et/ou aval. De plus, l'émergence d'un nouveau besoin (réutilisation), d'une nouvelle activité et de nouvelles parties prenantes rendent la filière encore plus complexe.

La **deuxième source** de complexité est celle liée aux **incertitudes**. Nous pouvons distinguer l'incertitude d'ordre **technologique** liée à la filière et l'incertitude liée à son environnement.

La première, l'incertitude d'ordre **technologique**, traduit la possibilité de déployer plusieurs **options de valorisation**, avec une **multitude de procédés** pour chacune, ces procédés étant eux-mêmes à différents stades de développement ou d'industrialisation. On comprend facilement la complexité de développer des procédés de valorisation pour des batteries, qui elles-mêmes sont en développement.

La deuxième incertitude concerne les éléments de **l'environnement de la filière** comme le marché des VEs, la disponibilité des matières premières, les besoins énergétiques et la réglementation. Ces incertitudes sont davantage amplifiées avec la taille du **périmètre que nous considérons** : périmètre géographique européen et un périmètre temporel allant jusqu'à 2040, voire plus.

La **dernière source de complexité** est la présence d'**interactions, rétroactions et délais** entre les éléments qui animent l'évolution de cette filière. Nous pouvons reprendre l'exemple d'interaction de la technologie de la batterie qui influence le développement des options et des procédés de valorisation. Pour les **rétroactions** et les **délais**, nous citons l'exemple suivant : *la disponibilité des matières premières* qui influence le développement du marché VE et ainsi le volume des batteries à recycler après un certain délai, correspondant à la durée de vie du VE. Le volume des batteries à recycler, la technologie de la batterie et les procédés de

recyclage définissent les quantités de matières secondaires recyclées. Par conséquent, la possibilité d'augmenter ou non *la disponibilité des matières premières*.

Pour appréhender cette complexité, nous serons amenés à choisir les bons outils et théories académiques, ce que nous verrons également à la section suivante.

Enfin, la **dernière caractéristique** de cette filière concerne sa nature **sociotechnique**. En effet, la filière intègre des aspects **technico-économiques** et **organisationnels**. Les aspects technico-économiques concernent: les options de valorisation, les procédés de traitement, les investissements nécessaires et les revenus des options de valorisation. Les aspects organisationnels font référence à la gouvernance entre les différentes parties prenantes, en définissant le périmètre, la mise en place et le pilotage des activités de chacune. Bien évidemment, ces points de vue technico-économiques et organisationnels ne sont pas disjoints, les différentes formes de gouvernance dépendent des parties prenantes et options de valorisations identifiées.

Pour l'étude de la filière, ces deux points (technico-économiques et organisationnels) sont abordés dans la suite de notre travail.

Au bilan on retiendra que, la filière doit être étudiée d'un point de vue technico-économique et organisationnel, le tout dans une démarche prospective, afin de tenir compte de son émergence et de ses évolutions. La complexité doit être traitée avec les bonnes approches académiques. **Ainsi, notre problématique est formulée de la manière suivante :**

Comment étudier la filière de valorisation des batteries des véhicules électriques d'un point de vue technico-économique, organisationnel et prospectif et ce en tenant compte des différentes complexités?

L'intérêt industriel à l'égard de ce travail de recherche, peut se résumer en deux points principaux. Le premier concerne la **compréhension des mécanismes** qui vont régir l'évolution de la filière de valorisation. Ces mécanismes sont à titre d'exemple : la réglementation, la criticité des matières, la technologie de la batterie et les volumes à traiter. Le deuxième intérêt concerne l'élicitation des **futures configurations possibles** de cette filière à travers les éléments la caractérisant, comme les options de valorisation et la gouvernance. Ce qui a pour but l'aide au choix de positionnements stratégiques futurs.

Nous tenons à clarifier un dernier point concernant la logistique, qui est un coût important dans les filières de valorisation. D'ailleurs, beaucoup de travaux sur les filières de valorisation s'intéressent à l'optimisation logistique, comme nous le verrons à la section (2.2.1).

Il est fait choix ici en accord avec l'industriel de ne pas considérer les aspects logistiques pour les raisons suivantes. La première raison est le niveau de maturité de la filière de valorisation des BLIs qui en est encore au stade de développements des technologies de valorisation, la question de la logistique et en particulier son optimisation ne peut se traiter qu'après ces développements technologiques. La deuxième raison vient du fait que nous nous sommes concentrés sur le **système batterie** ; à l'image du contexte exposé au chapitre 1, afin de traiter les questions économiques et environnementales liées à cette dernière : respect de la réglementation sur le recyclage, réduction du coût et impact environnemental globaux de la batterie, disponibilité des matières premières.

A ce stade, le positionnement académique nécessaire à l'appréhension de notre problématique est explicité à la section suivante.

2.1.2 Positionnement académique

Le traitement de notre problématique (*Comment étudier la filière de valorisation des batteries des véhicules électriques d'un point de vue technico-économique, organisationnel et prospectif et ce en tenant compte des différentes complexités ?*) d'un point de vue académique nécessite d'aborder deux champs de recherche :

- La maîtrise et le traitement de la complexité
- L'aide à la conception, ici de la filière⁷.

Chacun de ces deux champs est introduit et justifié dans les deux sections suivantes.

2.1.2.1 Nécessité d'un paradigme systémique

Nous rappelons que l'objet de l'étude de notre travail est la filière de valorisation des batteries des véhicules électriques. Nous avons montré ses trois formes de complexité induites par :

- La multiplicité des parties prenantes qui s'y attachent, avec des perspectives et des attentes différentes. Ces parties prenantes se retrouvent dans les différentes strates du contexte dressé en chapitre 1.

⁷ Si ce n'est pas spécifié, les termes : filière, filière de valorisation, filière de valorisation des BLIs font référence à la filière de valorisation des batteries des véhicules électriques en fin de vie.

- La présence d'incertitudes sur les technologies des batteries et des procédés de valorisation, ainsi que l'incertitude liée à l'environnement de la filière.
- La présence d'effets d'interactions entre les éléments qui animent cette filière, avec des délais et des rétroactions.

Notre problématique peut être assimilée à ce que Le Moigne (1990) appelle le *problème du concepteur*, expliqué de la manière suivante par Morin (1977) : « *Le problème de l'observateur-concepteur nous apparaît comme capital, critique, décisif ... il doit disposer d'une méthode qui lui permette de concevoir la multiplicité des points de vue puis de passer d'un point de vue à l'autre. Il doit disposer de concepts théoriques qui, au lieu de fermer et isoler les entités, lui permette de circuler productivement ... Il a besoin aussi d'une méthode pour accéder au méta-point de vue sur les divers points de vue ...* ».

La systémique est une approche qui met en œuvre ce type de méthodes. Par conséquent, c'est un cadre adapté à l'analyse de notre problématique. Nous considérerons la filière comme un système complexe.

La section suivante justifie ce positionnement, en illustrant ce concept et démontrant la nature complexe de la filière étudiée.

2.1.2.1.1 Notions de systémique

La recherche dans le domaine des systèmes complexes est transverse aux disciplines des sciences de l'ingénieur et du management. Elle fournit une variété d'outils, y compris des outils conceptuels pour nous aider à comprendre les caractéristiques de ces systèmes, des outils analytiques pour nous aider à étudier ces systèmes en profondeur et des modèles de simulation pour nous aider à analyser la dynamique de ces systèmes (Ergin, 2012).

La pensée systémique (La systémique, la vision systémique, en anglais *systems thinking*) est un mode de pensée qui considère les objets étudiés comme des systèmes complexes et les traite d'une manière holistique, à savoir que le système est plus grand que la somme de ses composants. Elle repose sur une **épistémologie constructiviste**, par opposition à une **épistémologie positiviste**, qui considère un mode de pensée analytique cartésien classique.

Il existe plusieurs définitions complémentaires de la pensée systémique. Sterman (2000) la définit comme *la capacité de penser un système dans son ensemble, plutôt que de ne considérer que les parties individuellement. Elle perçoit le monde comme un système*

complexe et soutient la compréhension de ses interdépendances et interrelations. Senge (1990) la définit comme « *Un cadre pour voir des interdépendance plutôt que des objets, pour voir des schémas de changement plutôt que des clichés statiques* ». Davidz (2006) met l'accent sur cette notion d'interdépendance et définit la pensée systémique comme « *L'analyse, la synthèse et la compréhension des interconnexions, les interactions et interdépendances qui sont d'ordre technique, social, temporel et multi-niveaux* ». Nous retiendrons la définition du collège français de systémique, représentée d'une manière « systémique » dans la figure suivante.

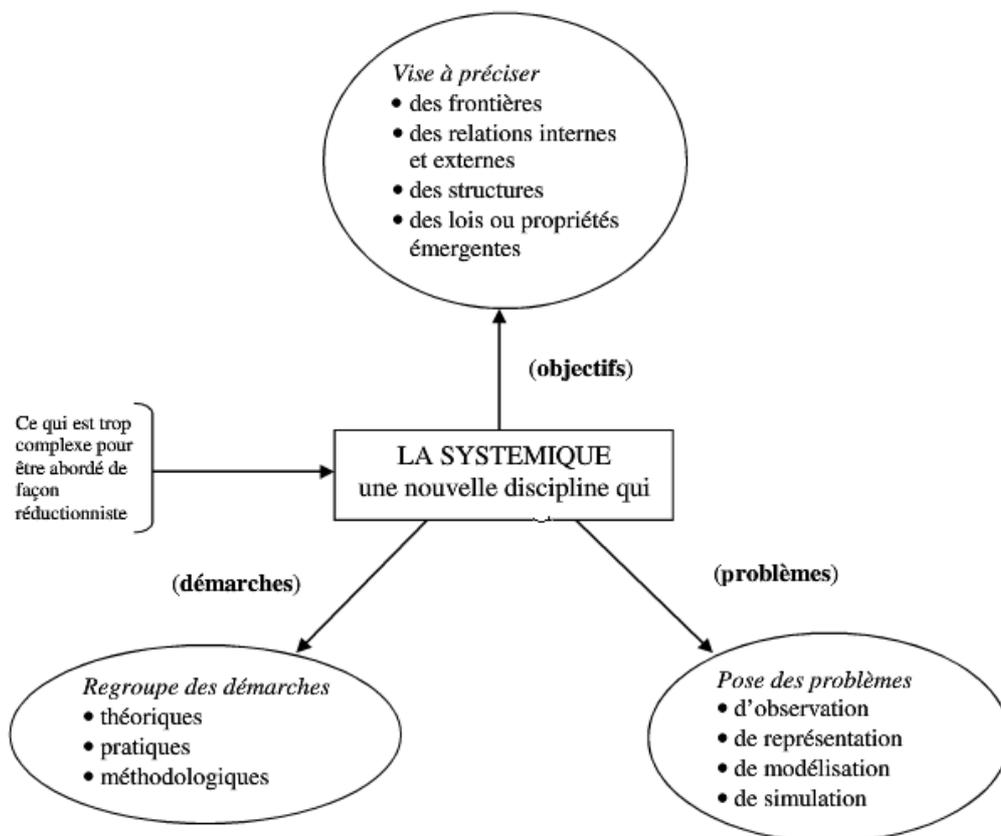


Figure 2.3. Définition de la systémique par le collège français de systémique. Source : (Durand, 2013)

Jusqu'ici, nous avons introduit le mode de pensée ou paradigme scientifique qui traite des systèmes complexes. Dans la section suivante, nous définirons le concept de « système complexe » et en quoi notre objet d'étude peut être considéré comme tel.

2.1.2.1.2 La filière de valorisation des BLIs comme « système complexe »

Bertalanffy (1973) définit un système comme « *un ensemble d'unités en interrelations mutuelles* ». Morin (1977) met l'accent sur la globalité : « *Unité globale organisée d'interrelations entre éléments, actions ou individus* ». Cependant, celle de Le Moigne (1999), nous apparaît la plus adaptée à notre problématique : « *un objet qui, dans un*

environnement, muni de finalités, réalise une activité et voit sa structure évoluer au cours du temps, sans perdre son identité propre ».

Pour Le Moigne (1999), un système est un ensemble isolable d'éléments caractérisé par quatre axes:

- un axe ontologique, qui représente sa structure, ce qu'il est : moyens ;
- un axe fonctionnel, qui représente son activité, ce qu'il fait : processus ;
- un axe génétique, qui représente son évolution, ce qu'il devient : cycle de vie ;
- un axe téléologique, qui représente sa finalité dans son environnement, ce qu'il a pour objectif

Conformément à ce que l'on sait désormais de tout système, la filière est **finalisée**, c'est-à-dire qu'elle a un but, à savoir se conformer aux différentes motivations de valorisation expliquées au chapitre 1 (réglementaire, géostratégique, économique et environnementale). Ces finalités permettent d'identifier les parties prenantes de la filière et d'isoler le périmètre à étudier.

Une fois identifiée dans son **environnement**, la filière apparaît comme **un ensemble de composants interconnectés** entre eux (gisements de batteries, circuits de valorisation, débouchés de valorisation), par des flux de matières, d'informations et d'argent. Cette filière va **évoluer** depuis sa phase d'étude de déploiement jusqu'à sa phase de démantèlement.

Autant d'éléments qui contribuent à **considérer la filière que nous étudions comme un système**, dont nous en verrons la représentation selon les quatre axes de (Le Moigne, 1999) au chapitre 3.

De plus, à travers la caractéristique de complexité illustrée au début de ce chapitre (2.1.1), nous en déduisons qu'il s'agit d'un système complexe. Néanmoins, dans un souci de prudence et de rigueur, il convient d'interroger la nature complexe de cette filière. Pour ce faire, définissons d'abord la notion de complexité.

Edmonds (1999), après avoir examiné cette notion à travers plusieurs disciplines, la définit de la manière suivante : *« la complexité est cette propriété d'un modèle qui le rend difficile à formuler son comportement global dans un langage donné, même lorsqu'on dispose d'informations sur ces composants atomiques et leurs interconnexions »*. Donnadiou et Karsky (2002) distinguent trois types de complexité :

- **La Complexité Spatiale** : appelée aussi « Complexité de détails », facilement traitée par le progrès sur les ordinateurs et logiciels du type tableurs.
- **La Complexité "imprévisible"** : elle caractérise les systèmes chaotiques, bifurcatoires, fractals, pour lesquels le comportement temporel est quasiment imprévisible, car il comporte des non-linéarités et dépend fortement de certains paramètres.
- **La Complexité Dynamique** : Contrairement à la complexité spatiale, où il est possible de prédire le comportement statique d'un tel système complexe, il sera plus difficile de le faire dans le temps, dès lors qu'il y a présence de **boucles de rétroaction**, qui agissent comme des cercles « vertueux » ou « vicieux ». C'est ce qui fait la source de la complexité dynamique.

En considérant cette classification de la complexité, nous considérons que notre filière comporte une **complexité dynamique**. La présence de boucles de rétroaction, dont nous avons vu un exemple en section (2.1.1), doit être traitée par les bons outils systémiques, notamment la **dynamique des systèmes**. Nous y reviendrons longuement au chapitre 3.

En plus de la complexité dynamique de la filière, nous avons identifié l'incertitude et la présence de plusieurs parties prenantes comme sources de complexité supplémentaires. Ces aspects sont traités dans la pensée systémique par une littérature spécifique, appelée **méthodes de structuration des problèmes complexes** (*Problem structuring methods*). Ces problèmes complexes sont caractérisés par : l'existence de plusieurs acteurs, plusieurs perspectives, d'intérêts incommensurables ou conflictuels, l'absence de consensus sur le périmètre du problème ainsi que la présence d'incertitudes (Mingers and Rosenhead, 2004; Rosenhead and Mingers, 2001). Nous y reviendrons également au chapitre 3.

La filière peut donc être considérée comme un système complexe, susceptible d'être appréhendé par une approche systémique. Par rapport à la typologie des systèmes selon leur degré de complexité, la filière se situerait même au niveau le plus élevé avec une complexité dynamique.

Comme nous l'avons souligné précédemment, cette filière est émergente. Il s'agit donc, d'un système complexe **émergent ou en émergence**. Nous préférons la dernière dénomination. Puisque la notion de système complexe **émergent** a été déjà utilisée dans la littérature (Funtowicz and Ravetz, 1994; Valckenaers et al., 2003), pour faire référence à la propriété

« émergence » comme la source de complexité (Georgiou, 2003) (le système développe des propriétés émergentes du fait de l'interaction entre ses composants).

Nous qualifions également notre système **d'organisationnel**, du fait de la multiplicité des parties prenantes, afin de le distinguer des autres systèmes où il n'y pas de composante humaine. Nous tenons à préciser que cette appellation ne renvoie pas forcément au courant de recherche « cybernétique organisationnelle » (Beer, 1995, 1981; Espejo and Reyes, 2011), qui traite aussi des systèmes organisationnels complexes.

Donc, la filière de valorisation des batteries des véhicules électriques peut être considérée comme un « **système organisationnel complexe en émergence** »

En introduction de cette section sur le positionnement académique, nous avons énoncé la double problématique académique qui ressortait de la description faite de la filière:

- La maîtrise et le traitement de la complexité ;
- L'aide à la conception de cette filière.

Nous venons de montrer la nécessité et l'adéquation de la pensée systémique pour la première. A présent, passons à la seconde.

2.1.2.2 Nécessité d'une approche prospective d'aide à la conception de la filière

Nous l'avons évoqué lors de la description du contexte industriel, la filière de valorisation étudiée est en émergence. De ce fait, les approches académiques de gestion de systèmes existants ne sont pas en adéquation avec notre travail de recherche.

Ce qui nous intéresse est l'élaboration et la comparaison des **scénarios** d'évolutions possibles de la filière, à l'image de la fameuse citation de St Exupéry : « *Pour ce qui est de l'avenir, il ne s'agit pas de le prévoir, mais de le rendre possible* ». Cela permet d'anticiper et de préparer l'avenir, en testant des stratégies dans un ensemble cohérent et crédible d'histoires.

Ce point intéresse fortement notre partenaire industriel, qui dans cette période d'incertitude et de complexité de la filière, a besoin de grilles de lectures pour déterminer ses choix industriels stratégiques futurs.

Les **scénarios** sont des récits d'environnements alternatifs dans lesquels les décisions d'aujourd'hui peuvent être testées. La planification par scénario est utilisée par les organisations comme un outil de prise de décision pour **développer des projets, créer des**

stratégies fiables, éviter l'incertitude et la complexité (Amer et al., 2013). Pour être efficaces, les scénarios doivent être plausibles, cohérents et offrant un aperçu de l'avenir (Tankersley, 2006).

Donc, il y a nécessité de mobiliser une approche prospective, en faisant appel à des outils comme la simulation et les scénarios, afin d'éclairer des choix de décision pour la conception de la filière. Cela implique de se projeter dans l'avenir, afin d'imaginer des scénarios de filières possibles et de les analyser. La scénarisation est systémique, car elle considère les différents aspects technico-économiques et organisationnels évoqués en section (2.1.1). Notre démarche prospective est expliquée avec plus de détail à la section (2.4.2). Le chapitre 4 lui est consacré.

En résumé, la filière de valorisation des BLIs peut être considérée comme « un système organisationnel complexe en émergence ». Par conséquent, son étude doit être faite dans un paradigme systémique. Etant donné l'émergence de cette filière, une approche prospective est nécessaire, à travers l'élaboration et la comparaison de scénarios de déploiement.

Le contexte industriel et académique définis, nous allons maintenant préciser nos questions de recherche. Au travers de l'état de l'art qui sera présenté à la section suivante, nous identifierons les axes de recherche retenus. Nous formaliserons ensuite, à partir de l'analyse de l'écart entre l'existant et nos aspirations industrielles et académiques, nos questions de recherche.

2.2 Etat de l'art

Cette thèse a pour titre : **La filière de valorisation des batteries de véhicules électriques en fin de vie. Contribution à la modélisation d'un système organisationnel complexe en émergence**. A l'issue de la section (2.1), nous avons formulé notre problématique exprimée de la manière suivante : **Comment étudier la filière de valorisation des batteries des véhicules électriques d'un point de vue technico-économique, organisationnel et prospectif et ce en tenant compte des différentes complexités?**

A présent, nous allons confronter cette question à l'analyse de la littérature existante, en distinguant deux parties principales : **les travaux traitant des filières de valorisation** (sans spécification du produit) et **les travaux traitant de la valorisation des BLIs**. La première

partie a pour but d'identifier des éléments génériques aux filières de valorisation, qui pourraient être utiles dans le cas spécifique des BLIs.

2.2.1 Travaux traitant des filières de valorisation

Le sujet étudié ici est la valorisation d'un produit en fin de vie. Ce type de problématique est notamment traité dans la littérature sur la **logistique inverse** (*reverse logistics*). Selon l'*American Reverse Logistics Executive Council*, la logistique inverse est définie comme « *Le processus de planification, d'implantation, et de contrôle de l'efficacité, de la rentabilité des matières premières, des en cours de production, des produits finis, et l'information pertinente du point d'utilisation jusqu'au point d'origine dans le but de reprendre ou générer de la valeur ou pour en disposer de la bonne façon* » (Rogers and Tibben-Lembke, 1999).

La littérature de la logistique inverse appartient aux disciplines de la recherche opérationnelle et du management des opérations, le focus est mis sur les aspects de planification et d'optimisation logistique (Goudenege, 2013; Govindan et al., 2015). **En ce qui nous concerne, ces éléments ne rentrent pas dans le périmètre de notre travail, comme nous l'avons expliqué à la section (2.1.1).**

Ce qui nous intéresse le plus, dans ce corps de littérature, est la **caractérisation des filières de valorisation**. Notre filière étant émergente, il est intéressant d'identifier l'existence de typologies de modèles de filières, dans le but de les transposer à notre filière à concevoir.

Ainsi, pour définir une filière de valorisation, on va s'attacher à décrire ce qui la caractérise. Pour y répondre Fleischmann et al. (1997) posent les questions suivantes : quoi (le type de produit traité), comment (les formes de valorisation) et par qui (les acteurs et leurs rôles). A partir de ces éléments, Gaucheron (2000) propose la définition suivante : une filière de valorisation regroupe nécessairement :

- **Quoi** : Un gisement de produits en fin de vie ou entrants répondant à un cahier des charges en adéquation avec celui du circuit de valorisation choisi.
- **Comment** : Un circuit de valorisation correspondant à une succession de procédés permettant de transformer l'entrant et de lui apporter une valeur ajoutée pour obtenir un sortant en accord avec le marché.
- **Pour qui** : Un débouché, soit un sortant avec un cahier des charges correspondant aux exigences d'un marché donné.

Cette définition permet d'identifier le **périmètre** du système complexe « filière » et de le décomposer en **sous-systèmes** : « Gisements », « circuit de valorisation » et « débouchés ». Ces sous-systèmes peuvent à leur tour être décomposés en sous-systèmes, comme nous le verrons au chapitre 3.

Fleischmann et al. (2000) ont enrichi chacune des parties de la proposition de (Gaucheron, 2000), en précisant les caractéristiques du produit à traiter, les procédés intégrés au circuit de valorisation. Ils ont aussi rajouté les opérateurs associés, en indiquant qu'une filière est plus qu'une succession d'activités, elle concerne également les acteurs associés à ces activités.

La précision de (Fleischmann et al., 2000) permet d'identifier une partie des **parties prenantes** du système complexe « filière », à savoir les acteurs industriels qui interviennent directement dans la filière.

L'ensemble de ces définitions donne des éléments de **modélisation de la filière comme système complexe**. Des éléments qui doivent être complétés pour une modélisation globale (ensemble des parties prenantes, leurs attentes, mécanismes d'évolution et autres).

Jusqu'ici, nous avons énoncé les éléments d'une filière qui sont : le produit entrant, le circuit de valorisation, les débouchés et les opérateurs associés. C'est ce que Maudet-Charbuillet (2009) appelle les « caractéristiques internes » d'une filière. L'auteur rajoute d'autres caractéristiques et représente la filière de la manière suivante :

- des caractéristiques internes techniques: le produit entrant, le circuit de valorisation et les opérateurs associés ;
- des caractéristiques économiques comme le marché ;
- des caractéristiques organisationnelles : mode d'organisation et de financement ;
- des caractéristiques externes : la variabilité temporelle et géographique (Mathieux, 2002), la structure de la filière et le contexte lié à la valorisation (Fleischmann et al., 2000).

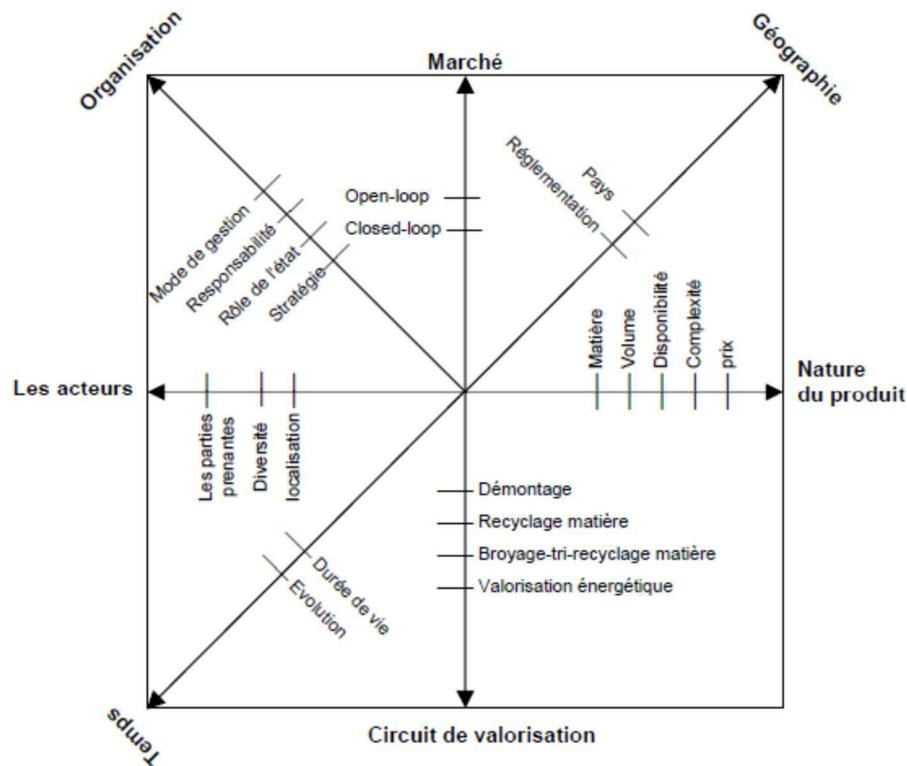


Figure 2.4. Axes de caractérisation d'une filière de valorisation (Maudet-Charbuillet, 2009).

Cette dernière caractérisation est plus complète. Elle détaille l'ensemble des questions relatives aux aspects technico-économiques, organisationnels et prospectifs que nous proposons d'étudier dans ce travail de recherche, dans les périmètres géographiques et temporels que nous avons définis.

Maudet-Charbuillet (2009) conclut « *Compte-tenu de la diversité des combinaisons de valeurs de caractéristiques possibles, une analyse ne peut être spécifique qu'à un type de filière* ».

Nous adaptons et présentons ce que nous retenons de cette caractérisation à la section (2.3).

D'une manière spécifique aux réseaux de remanufacturing et **aux aspects organisationnels**, El korchy et Millet (2011) décomposent la filière en un réseau logistique générique et un procédé de traitement générique. Le réseau logistique générique comporte quatre acteurs/fonctions : les clients, les centres de regroupement, un entrepôt central et un centre de production. Le procédé de traitement générique comporte trois activités majeures : l'inspection -tri des produits, le démontage - nettoyage, l'inspection - tri des modules (El korchy and Millet, 2011). Ainsi, la filière de valorisation est une combinaison possible entre les acteurs du réseau logistique et les activités du procédé de traitement. Au final, 18 configurations sont possibles.

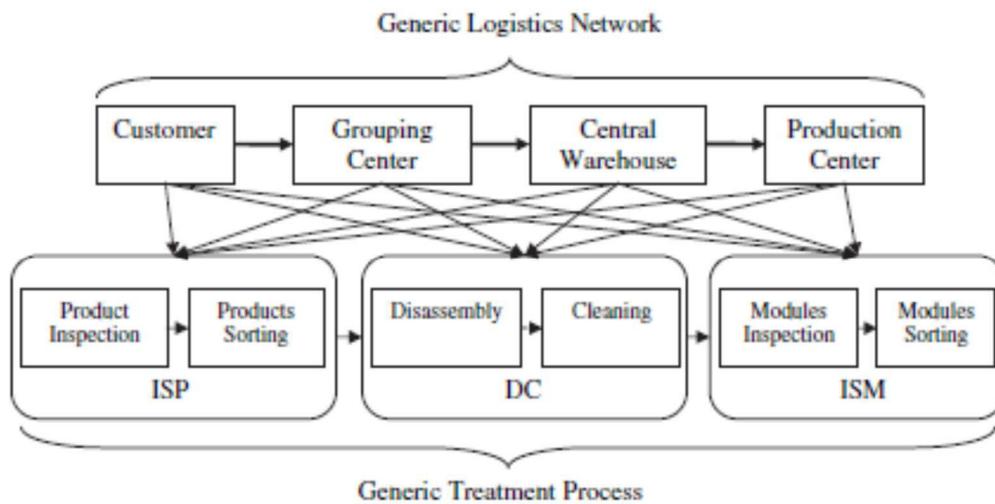


Figure 2.5. Combinaison entre les acteurs du réseau et les activités du procédé (El korchy and Millet, 2011)

Une approche en deux étapes a été développée pour l'aide au choix de la bonne configuration : (i) identification de la structure actuelle de la filière, (ii) choix d'une configuration potentielle en procédant à des évaluations de faisabilité, économique, environnementale et sociale. **Une approche dont nous allons nous inspirer pour étudier notre filière d'un point de vue organisationnel.**

Pour cette partie, nous retenons que le cœur de cette littérature traitant des aspects logistiques de la filière ne pourra pas être mobilisé pour notre travail comme nous l'avons expliqué précédemment. Toutefois, nous garderons de cette littérature **les éléments caractérisant les filières de valorisation**, nécessaires à notre modèle de représentation, que nous retrouvons au chapitre 3.

Nous allons maintenant focaliser notre revue de littérature sur les travaux traitant de la valorisation des BLIs.

2.2.2 Travaux traitant de la valorisation des BLIs

Il y a très peu de travaux qui traitent de la valorisation des batteries lithium-ion (BLIs). Cela s'explique en partie par l'émergence assez récente de cette problématique, et d'autre part, par la nécessité de plusieurs compétences et d'expérimentations afin de disposer de données fiables. Les **projets de recherche** collaboratifs qui regroupent plusieurs institutions académiques et industrielles sont alors plus adaptés à la recherche appliquée de cette thématique. La figure suivante ; adaptée et actualisée de (Frost & Sullivan, 2010), synthétise les projets que nous avons identifiés, en distinguant ceux traitant la 2nd vie uniquement (en jaune), le recyclage uniquement (en rouge) ou les deux (en noir).

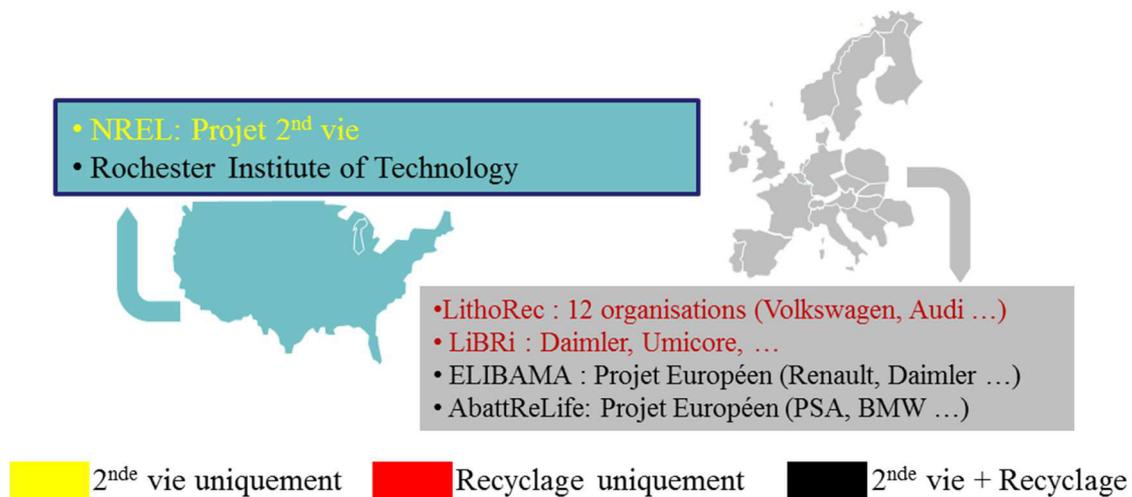


Figure 2.6 Projets industriels et académiques, en relation avec la valorisation des BLIs. Adaptée et actualisée de (Frost & Sullivan, 2010)

Nous remarquons que ces projets sont concentrés en Europe et aux Etats-Unis, particulièrement dans les zones avec des politiques promouvant des véhicules électriques comme la France, l'Allemagne ou la Californie. Les travaux issus de ces projets représentent une grande part de cette littérature. Ces projets et leurs principaux résultats sont exposés ci-après.

Le laboratoire des énergies renouvelables en Californie (*NREL*) travaille sur un projet de seconde vie des batteries (*PHEV/EV Li-Ion Battery Second-Use Project*) depuis 2011. L'objectif de ce projet est d'investiguer la possibilité de rajouter une valeur à la batterie lors de l'usage en 2nde vie, ce qui va contribuer à amortir le coût initial de la batterie. Le projet compte trois étapes (Neubauer and Pesaran, 2010):

- Identifier, évaluer et vérifier la rentabilité des différentes applications secondaires des batteries des véhicules électriques ;
- Mettre en place des programmes d'essais à partir de batteries Li-ion usagées mais à défaut avec des batteries ayant subi des tests de vieillissement en laboratoire ;
- Diffuser les résultats, les outils développés et les données pour informer les acteurs du marché potentiel, proposer des standards aux industriels et des changements de régulation.

A travers quelques travaux publiés (Neubauer and Pesaran, 2011, 2013; Neubauer et al., 2012), nous pouvons résumer quelques conclusions de ce projet dans les points suivants :

- Le stockage communautaire doit être privilégié, car les applications à plus grande échelle nécessiteront plus d'opérations de sécurisation, de tests pour regrouper des batteries de technologies différentes ;
- Les batteries des VHR ont moins de potentiel de réutilisation que celles des véhicules tout électrique ;
- La possibilité de réduire le coût initial des batteries actuelles est peu probable, moins de 11% dans les cas optimistes ;
- L'estimation du vieillissement et performance des batteries ; en usage automobile et en réutilisation, est difficile et crucial.

Les éléments développés dans ces travaux s'intéressent uniquement aux aspects technico-économiques du sous-système de la 2nde vie. Ils nous seront très utiles, en particulier les différentes hypothèses de coûts et de revenus du reconditionnement.

LithoRec⁸ et LithoRec II est un consortium de 12 organisations académiques et industrielles (Audi AG, Volkswagen AG, Universität Münster, etc.), financé par le gouvernement Allemand, et qui a pour but d'évaluer le déploiement d'une structure à échelle industrielle, ainsi que les procédés pour le recyclage des BLIs en Allemagne, le tout d'une manière économique et respectueuse de l'environnement. L'approche stratégique du projet est expliqué dans (Hoyer et al., 2011), elle comporte trois étapes :

- Analyse des caractéristiques de la problématique ;
- Description des acteurs et des besoins à prendre en compte ;
- Utilisation d'une approche de planification (Localisation et capacité des unités de traitement, choix des processus de traitement, moment de leurs installations).

L'impact du taux de recyclage réglementaire de 50% est étudié dans (Hoyer et al., 2013). La décision d'investissement dans un réseau de recyclage est comparée dans les deux situations ; avec ou sans taux de recyclage réglementaire, d'un point de vue retour sur investissement, taux de recyclage atteint, déchets enfouis. Ils démontrent que le fait de fixer un taux de recyclage réglementaire (50%) apporte une augmentation marginale sur le taux de recyclage atteint (0,1% à 1,4%). Cependant, il dégrade la rentabilité des investissements, en obligeant l'installation immédiate d'unités de traitement (avec des faibles volumes). Ils concluent que la

⁸ www.lithorec.de

réglementation devrait permettre le stockage des batteries en fin de vie, jusqu'à l'obtention de volumes suffisants (entre 2017 et 2020).

Dans un autre travail plus approfondi, Hoyer et al. (2014) analysent la rentabilité d'un tel investissement en considérant l'effet du taux de recyclage réglementaire et des paramètres incertains. L'incertitude a été traitée par des scénarios. 5 scénarios représentatifs du large éventail des possibilités ont été élaborés. **L'outil utilisé est l'optimisation par la programmation linéaire mixte.**

En plus des analyses de rentabilité, les auteurs se sont intéressés à **l'organisation des acteurs**. Il faut rappeler que les auteurs ont pris les hypothèses suivantes.

- Considération du procédé suivant: Démontage, traitement mécanique, traitement hydro-métallurgique ;
- Considération d'un seul acteur responsable des trois opérations, puis le cas où il y aura des acteurs distincts pour chacune.

L'activité de collecte n'a pas été discutée puisqu'elle sera à la charge du constructeur dans tous les cas (Hoyer et al., 2014). Deux conclusions principales, illustrées dans la figure suivante, sont mises en avant : (1) les cash-flows annuels sont très dynamiques, indiquant que les constructeurs devront payer le recyclage dans les premières années. (2) L'allocation des cash-flows entre les acteurs est très hétérogène, indiquant des profitabilités et des prises de risques différentes. Hoyer et al. (2014) concluent que cette disparité de profits et de prises de risque, nécessitera la mise en place de mécanismes de coopérations (joint-ventures).

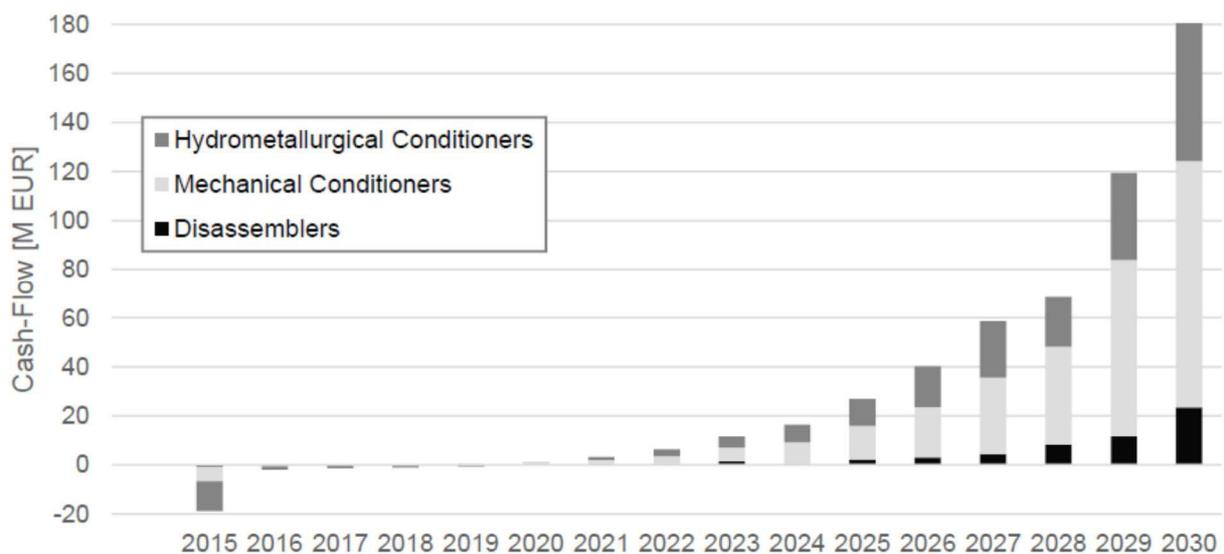


Figure 2.7. Cash-flows pour les trois acteurs (scénario de base). Source : (Hoyer et al., 2014).

Ce projet a étudié le sous-système de recyclage d'un point de vue technico-économique, organisationnel et prospectif, avec un focus sur les aspects logistiques. Les résultats concernent le périmètre géographique Allemand où un seul procédé de recyclage et deux technologies de batteries ont été retenus. Par conséquent, ils ne sont pas transposables en l'état pour notre problématique, au regard du périmètre géographique européen, la considération de plusieurs procédés pour le sous-système de recyclage et la considération du sous-système de la réutilisation en plus. Ce qui implique la considération de toutes les parties prenantes du système « filière de valorisation ». Cependant, une adaptation de leur démarche (scénarios sur l'incertitude) et l'utilisation des données d'entrée concernant le recyclage, pourraient nous être très bénéfiques.

Le troisième projet est celui du *Rochester Institute of Technology* (RIT), qui a pour but de :

- Caractériser la composition des batteries de grandes puissances, à la fois lorsqu'elles sont neuves et en fin de vie ;
- Simuler par des modèles physiques et évaluer le potentiel de récupération des solutions de recyclage et de réutilisation des batteries en fin de vie ;
- Evaluer le coût du cycle de vie, les impacts environnementaux et énergétiques des scénarios de recyclage et de réutilisation.

Même si le projet a pour ambition d'étudier les sous-systèmes de recyclage et de réutilisation, **seuls les résultats du sous-système de recyclage ont été publiés**. Richa et al. (2014) ont élaboré un modèle d'analyse de flux matières (*material flow analysis*) pour estimer le volume potentiel des batteries en fin de vie à traiter aux Etats-Unis. 3 scénarios ont été élaborés (Faible, Base, Important). Ils ont aussi quantifié la valeur économique de ces batteries. Les résultats indiquent une forte variabilité des revenus qui dépendent de la technologie des batteries, ce qui pose un challenge pour le développement d'une infrastructure de recyclage. Sachant que, contrairement à l'Europe, le recyclage des batteries n'est pas obligatoire aux USA. En plus d'une analyse économique similaire, Wang et al. (2014a) ont aussi caractérisé cette variabilité des technologies d'un point de vue environnemental.

Wang et al. (2014b) se sont intéressés à l'effet d'échelle du volume des batteries à traiter sur la rentabilité de l'activité de recyclage. Cependant, **le travail s'est appuyé sur les petites batteries pour ses hypothèses**. Ils concluent que le taux de collecte devrait être augmenté afin d'avoir des seuils de volumes qui garantissent la rentabilité.

A l'instar des travaux précédents, un seul sous-système de valorisation a été étudié, à savoir celui du recyclage. Le périmètre géographique américain rend les résultats spécifiques aux contextes non réglementés, ce qui n'est pas notre cas d'étude.

En plus de ces projets développés ci-dessus, Il existe d'autres projets en cours (LiBRi, ELIBAMA, AbattReLife), pour lesquels nous sommes en attente de résultats publiés. Néanmoins, nous allons donner un aperçu de leurs objectifs.

- LiBRi (*Lithium Battery Recycling Initiative*) est un projet sur le recyclage des batteries lithium des VEs, piloté par Umicore, Daimler, l' Öko-Institut et l'UT de Clausthal. Le projet a pour but de développer des solutions industrielles pour le recyclage efficace et compatible avec l'environnement des batteries. L'accent est mis sur la voie de traitement par pyrométallurgie, combinée avec des étapes de transformation qui sont à développer aussi.
- ELIBAMA⁹ (*European Li-Ion Battery Advanced Manufacturing*) est un consortium de 17 organisations (Renault, Daimler, CEA, SAFT, SNAM, Umicore, etc.) qui s'intéresse à tout le cycle de vie de la batterie. Il a pour but d'accélérer la création d'une industrie européenne des batteries automobiles, structurée autour des acteurs déjà engagés, afin d'atteindre des gains économiques et environnementaux à travers la chaîne de valeur des batteries. Un rapport a été publié dans le cadre de ce projet (ELIBAMA, 2014). Cependant, ce dernier est davantage axé sur les résultats techniques que méthodologiques.
- AbattReLife¹⁰ (*Automotive Battery Recycling and 2nd Life*) est un consortium de plusieurs acteurs industriels et académiques (PSA, BMW, KEMA, l'UT Bergakademie Freiberg, l'UT de Belfort-Montbéliard, etc.). Son but est d'évaluer les obstacles technologiques pour une meilleure durée de vie de la batterie ainsi que les technologies les plus appropriées pour assurer une réutilisation et recyclage des batteries à la fin du cycle de vie.

Nous l'avons mentionné précédemment, les résultats des projets constituent une grande part de cette revue de littérature. D'autres travaux qui ne sont pas issus de ces derniers existent également. Ils sont présentés ci-dessous.

⁹ Voir (<https://elibama.wordpress.com/>) pour plus d'informations sur le projet et ses partenaires

¹⁰ Voir (<http://www.abattrelife.eu/>) pour plus d'informations sur le projet et ses partenaires

Concernant le recyclage, les plupart des travaux que nous avons identifiés, traitent la problématique technologique du développement des procédés (Kwade, 2010; Sangwan and Jindal, 2013; Xu et al., 2008; Zeng et al., 2013; Zhang et al., 2013). Ces travaux permettent d'identifier les types de technologies de recyclage mises en œuvre et en cours d'évolution. Cette littérature nous servira dans l'identification des hypothèses de nos analyses technico-économiques (procédés possibles, matières recyclées et avec quel taux de recyclage).

En ce qui concerne la réutilisation, la plupart des travaux se sont intéressés aux aspects technico-économiques de la 2nde vie. Ahmadi et al. (2014a), Heymans et al. (2014) ont étudié la faisabilité et rentabilité de la réutilisation des batteries pour le stockage stationnaire d'énergie, après avoir identifié et analysé les différentes options de réutilisation possibles au Canada. Ils concluent que la réutilisation a un potentiel de réduction d'émissions CO₂, en lissant la charge sur le réseau. Cependant, le potentiel économique est moins important dans les marchés d'énergie régulés.

A notre connaissance, (ADEME, 2011) est le seul travail qui a abordé la question de l'organisation de la filière autour du reconditionnement pour la 2nde vie. Il conclut que la filière va probablement se structurer autour du constructeur automobile, compte tenu de son savoir-faire spécifique, son souci d'image de marque et la responsabilité légale des batteries. Toutefois, ce travail n'écarte pas la possibilité de structuration de la filière à l'initiative d'un nouvel acteur « reconditionneur », qui s'occupera de reconditionner les batteries et de les remettre sur le marché à son nom.

A l'instar des travaux sur le recyclage, cette littérature sur la 2nde vie nous permettra d'identifier les hypothèses de nos analyses technico-économiques (options de réutilisation possibles, procédés de reconditionnement, revenus, etc.). Elle constitue aussi une base de départ pour notre étude de la filière d'un point de vue organisationnel, notamment sur le périmètre du reconditionnement.

En résumé, les travaux qui traitent de cette problématique sont peu nombreux, et surtout traitent d'aspects partiels de notre problématique. Concernant la réutilisation, l'étude du reconditionnement et des applications 2nde vie constitue l'ensemble des travaux identifiés. Le remanufacturing des BLIs n'a pas été abordé dans l'ensemble de cet état de l'art que nous venons d'exposer.

A notre connaissance, aucun travail n'a déjà traité notre problématique dans sa globalité en:

- Considérant simultanément toutes les options de valorisation (réutilisation et recyclage), ce qui implique une dispersion des volumes qui pourrait influencer la rentabilité de ces dernières.
- Considérant les aspects technico-économiques et organisationnels avec la prise en compte du lien entre les deux.

Outre les aspects déjà traités dans la littérature ; même d'une manière partielle, aujourd'hui nous ne disposons pas d'un **modèle** de représentation du système complexe « filière de valorisation » (périmètre, parties prenantes, activités, etc.). Une telle modélisation est un **prérequis**. La filière étant émergente, nous avons besoin d'un modèle de représentation afin de permettre l'étude de la filière sous les différents points de vue. La caractérisation des filières ; exposée en (2.2.1), nous sera utile dans notre modélisation. De plus, aucun des travaux existants n'avait investigué les mécanismes qui vont régir l'évolution de la filière. D'où la nécessité d'une approche de **modélisation et de simulation systémique**, comme nous l'avons déjà justifié.

En ce qui concerne l'étude de la filière d'un point de vue **organisationnel**, il va falloir considérer l'ensemble des parties prenantes de la filière de valorisation. Autrement dit, celles de la réutilisation et du recyclage, ce qu'on n'aurait pas fait si on s'était limité à une seule option de valorisation.

Enfin, la plupart des travaux ont été faits dans un cadre **prospectif**, ce qui pourrait servir dans notre étude, pour ce qui concerne le choix du nombre de scénarios représentatifs et les facteurs à considérer pour l'élaboration de ces derniers. Cependant, l'étude du périmètre européen n'a pas été réalisée auparavant. Cela nous pousse à réfléchir sur les facteurs spécifiques à ce dernier, comme la réglementation, le marché de l'énergie et le marché des VEs.

Grâce à notre étude de l'état de l'art relatif aux filières de valorisation, d'une manière générale et spécifique aux BLIs, nous sommes en mesure de formuler nos questions de recherche. C'est l'objet de la section suivante.

2.3 Formulation des questions de recherche

Il faut tout d'abord rappeler la problématique et le positionnement académique suivants:

- Comment étudier la filière de valorisation des batteries de véhicules électriques d'un point de vue technico-économique, organisationnel et prospectif et ce en tenant compte des différentes complexités ?
- Nécessité d'une approche prospective d'aide à la conception de la filière;
- Nécessité d'un paradigme systémique pour traiter la complexité.

L'analyse de l'état de l'art à la lumière de ces éléments, a montré que la problématique n'a pas été traitée dans sa globalité. Ainsi, notre travail peut être perçu comme une continuité synthétisante de l'ensemble des points de vue et sous-systèmes de la filière abordés en littérature (recyclage, réutilisation, technico-économie, gouvernance et prospective).

Il s'agit de faire appel aux hypothèses et résultats de ces travaux, en faisant attention aux interactions résultantes entre toutes ces dimensions (voir Figure 2.8). Notre travail a aussi pour but d'aborder les aspects non traités, comme **la modélisation** de la filière de valorisation spécifique aux batteries des véhicules électriques.

La filière étant émergente, nous avons montré que la modélisation est un prérequis afin de l'étudier selon les trois points de vue (technico-économique, organisationnel et prospectif). En prenant en compte notre positionnement académique, **considérant la filière comme un système complexe**, nous formulons la première question de recherche suivante :

Question de recherche 1

Comment modéliser la filière de valorisation des BLIs comme un système organisationnel complexe en émergence ?

Comme nous l'avons souligné plusieurs fois, notre étude concerne un système en conception. Ainsi, nous avons besoin d'une approche **prospective** d'aide à la décision pour la conception de la filière, en simulant et analysant des scénarios d'évolution. Cela nous permettra d'évaluer les aspects technico-économiques. Pour ce faire, nous formulons la deuxième question de recherche suivante :

Question de recherche 2

Comment faire de la prospective sur la filière de valorisation des BLIs ?

Enfin, l'aspect **organisationnel** est partiellement abordé en littérature. Nous avons trouvé un seul travail concernant le recyclage et un seul pour la réutilisation. Etant en présence de plusieurs parties prenantes dont les positionnements ne sont pas encore définis, nous formulons la troisième et dernière question de recherche suivante :

Question de recherche 3

Comment analyser la gouvernance de la filière de valorisation des BLIs ?

A travers ces trois questions de recherche, nous allons progressivement investiguer les différents axes caractérisant la filière de valorisation. En s'appuyant sur la caractérisation fournie par (Maudet-Charbuillet, 2009), illustrée dans la Figure 2.4, nous synthétisons sur la Figure 2.8 les différents axes de la filière, auxquels notre travail va apporter des réponses.

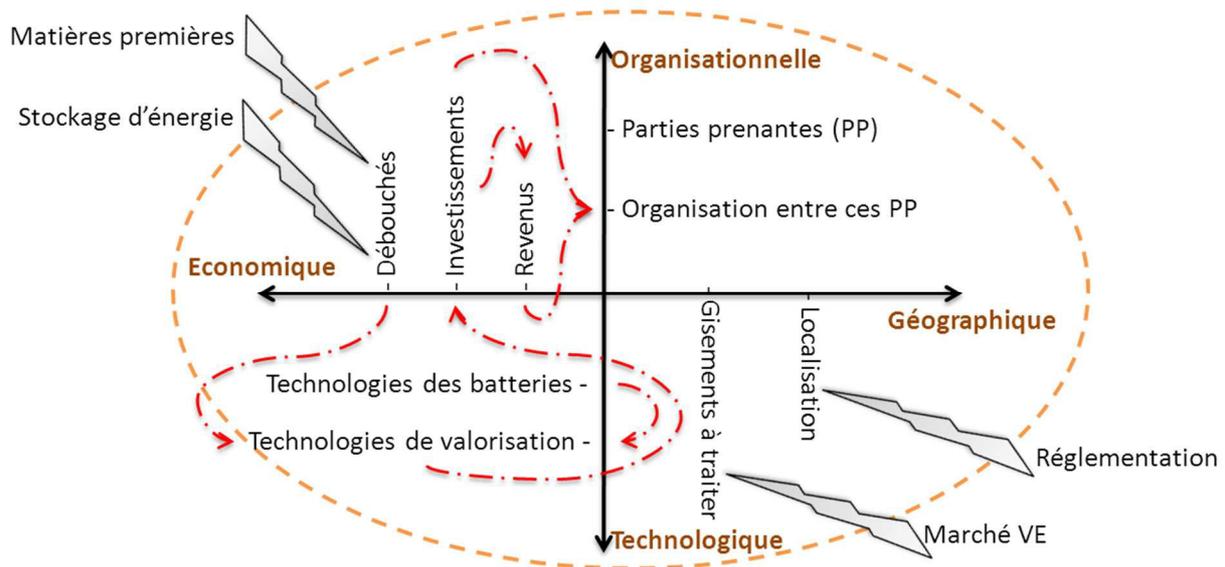


Figure 2.8. Axes de la filière étudiés dans notre travail, avec des exemples d'interactions entre ces axes.

La figure illustre quelques exemples d'interactions possibles entre les différents axes définissant la filière. La technologie de la batterie agit sur le choix des technologies de valorisation, qui sont aussi définies en fonction des débouchés de valorisation. Les technologies de valorisation définissent les investissements nécessaires pour les déployer

d'une part, et la qualité des produits valorisés d'autre part. La conjugaison de ces deux éléments influence la rentabilité des options de valorisation. Enfin, les investissements et la rentabilité des options de valorisation influencent les positionnements des parties prenantes sur les différentes activités de valorisation.

La figure montre également quelques exemples de l'effet de **l'environnement** sur la filière, à travers différents inducteurs qu'il faudra prendre en compte. En ce qui concerne les gisements de batteries à traiter (**inputs**), ils sont influencés par le développement du marché des véhicules électriques, qui va les définir à travers les différents pays européens. Cela influencera la localisation des unités de traitement, en prenant en compte la réglementation sur le transport des déchets transfrontaliers. Concernant les débouchés de valorisation (**outputs**), ils sont aussi influencés par la situation des marchés, où les produits valorisés seront commercialisés, notamment les besoins en matières premières et en stockage énergétique.

La modélisation systémique, a justement pour l'une des finalités, la mise en évidence des ces interactions (internes et externes). Cela justifie, une fois de plus, l'étude de la filière dans sa globalité, dans son environnement et sous les différents points de vue. Ce que nous proposons de réaliser dans ce travail, à travers ces trois questions de recherche.

La diversité des domaines de recherche relatifs aux trois questions de recherche, démontre son adéquation avec les problématiques du Génie Industriel. Pour répondre à ces trois questions de recherche, nous développons **une approche multidisciplinaire**, qui sera explicitée dans la section suivante.

2.4 Approche

Pour répondre aux questions de recherche (QR) soulevées ci-dessus, nous adoptons un positionnement mixte entre sciences de l'ingénieur et sciences de management. Un positionnement justifié par les différentes dimensions de la problématique. Selon P.E. de Janosi, ancien directeur de L'Institut international pour l'analyse des systèmes appliqués (IIASA) « *s'attaquer aux problèmes interdisciplinaires complexes nécessite l'utilisation d'une méthodologie sophistiquée qui prend suffisamment de connaissances depuis de nombreux domaines et disciplines et qui les synthétise avec succès dans un tout cohérent. Les approches*

traditionnelles conçues pour les questions relevant de la compétence d'une seule discipline ne sont malheureusement pas efficaces ».

La première QR peut être assimilée à la **fondation** sur laquelle se reposeront les deux QRs restantes. La deuxième et troisième QR s'appuieront sur les éléments de modélisation de la filière (parties prenantes, activités, mécanismes régissant le comportement du système, etc.) pour étudier la filière selon les différents points de vue (Figure 2.9).

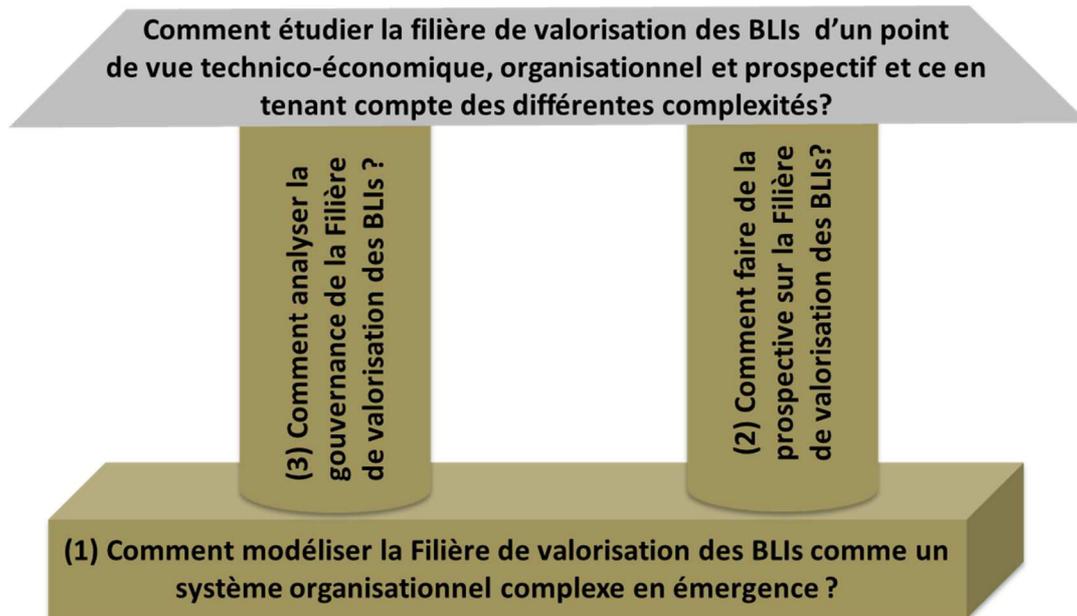


Figure 2.9. **Articulation des trois questions de recherche** pour répondre à la problématique.

Nous présentons trois analyses pour les trois QRs. Elles sont traitées dans les chapitres 3 (QR (1)), 4 (QR (2)) et 5 (QR (3)). Ainsi, des revues de littérature plus approfondies de ces QRs seront exposées dans leurs chapitres respectifs. Les contenus de ces trois chapitres relatifs aux trois QRs sont développés dans les paragraphes suivants.

2.4.1 Modélisation de la filière

Avant toute analyse sur le système, une première phase de caractérisation de ce dernier est nécessaire. C'est l'objet de la QR (1) qui consiste à modéliser la filière de valorisation comme un système complexe. Les objectifs principaux de cette première étape sont :

- **La caractérisation de la filière (parties prenantes, sous-systèmes, etc.)**
- **La compréhension des dynamiques d'évolution de la filière et l'identification des variables clés.** La compréhension des dynamiques d'évolution passe par

l'identification des variables qui créent ces dynamiques et leurs simulations. Les variables clés sont celles qui ont le plus d'impact dans ces dynamiques.

Pour y répondre, et comme justifié précédemment, nous allons nous appuyer sur les concepts de la pensée systémique. Cette dernière a servi de cadre et a donné naissance à d'autres méthodologies comme **la dynamique des systèmes** (Sterman, 2000), **les méthodes de structuration des problèmes** (*Problem structuring methods*) (Rosenhead and Mingers, 2001) et **la multimethodology** (Mingers and Gill, 1997).

Ces méthodologies sont revisitées dans le cadre de ce travail. L'état de l'art relatif à ces concepts et les résultats d'application à notre problématique sont développés au chapitre 3.

2.4.2 Prospective sur l'évolution de la filière

Dans cette étape, nous étudions la filière d'un point de vue technico-économique et prospectif, elle a pour but de construire et d'analyser des scénarios d'évolutions possibles de la filière de valorisation. Elle exploite les éléments de modélisation établis à l'issue de la QR (1), notamment les dynamiques d'évolution et les variables clés.

A partir des variables clés identifiées, nous allons construire des scénarios pour la simulation du modèle DS. Dans ces scénarios, nous allons procéder à l'analyse des dynamiques d'évolution de la filière permettant de l'étudier d'un point de vue technico-économique et prospectif (criticité des matières, coût de la fin de vie de la batterie, etc.).

Ces analyses font l'objet du chapitre 4.

2.4.3 Analyse de la gouvernance de la filière

Dans cette étape, nous étudions la filière d'un point de vue organisationnel, elle a pour but d'identifier et comparer les formes d'organisations possibles de la filière.

A l'issue de la première QR, l'ensemble **des parties prenantes** seront identifiées (Constructeurs, recycleurs, énergéticiens, etc.). L'ensemble des sous-systèmes, représentant **les activités**, seront également identifiés (collecte, inspection, recyclage, etc.). Ainsi, on peut s'attendre à des répartitions différentes de ces activités parmi ces parties prenantes.

L'analyse de la gouvernance suppose de considérer toutes les activités identifiées. Toutefois, **nous avons fait le choix de focaliser l'étude de la gouvernance sur l'activité du reconditionnement pour la 2nde vie**, étant donné notre contexte industriel sur lequel nous

reviendrons au chapitre 5. En conséquence, la question est de savoir comment les parties prenantes vont se positionner pour créer ou non cette activité qui n'existe pas aujourd'hui.

Un état de l'art des applications de réutilisation sera présenté au chapitre 5. Cet état de l'art nous permettra de sélectionner les applications les plus pertinentes à considérer. Ces applications seront ensuite caractérisées selon des critères que nous allons définir (complexité du reconditionnement, volume nécessaire par application, taille du marché, etc.). Par la suite une méthodologie de comparaison des typologies de gouvernance sera présentée.

Le tableau suivant récapitule les outils mobilisés, ainsi que les résultats obtenus le long de l'approche.

Comment étudier la filière de valorisation des batteries de véhicules électriques d'un point de vue technico-économique, organisationnel et prospectif et ce en tenant compte des différentes complexités ?		
Question de recherche	Outils et théories mobilisés	Livrables & Analyses développés
1- Comment modéliser la filière de valorisation des BLIs comme un système organisationnel complexe en émergence ?	Méthodes SCOS' Méthodes de structuration des problèmes (MSP) Dynamique des systèmes (DS)	Caractérisation du système (frontière, parties prenantes...) Identification des dynamique d'évolution du système ; Identification des variables clés du système
2- Comment faire de la prospective sur la filière de valorisation des BLIs ?	Planification par scénarios Dynamique des systèmes (DS)	Construction des scénarios pour la simulation du modèle DS Analyse de ces scénarios (criticité des matières, rentabilité des options, etc.)
3- Comment analyser la gouvernance de la filière de valorisation des BLIs ?	MacPMR (Méthode d'Aide à la Conception de Produits Mécatroniques Remanufacturables)	MadOFR (Méthodologie d'aide à la décision pour l'Organisation de la Filière de Reconditionnement)

Tableau 2.1. Récapitulatif de l'approche développée.

2.5 Conclusions du chapitre 2

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés de près à la filière de valorisation des BLIs, afin d'identifier ses caractéristiques industrielles. Nous retiendrons le caractère **émergent** et

complexe du système étudié, causé par plusieurs sources de complexité : multiplicité des parties prenantes, présence d'incertitudes, d'interactions et de rétroactions. Nous retiendrons également sa nature **sociotechnique**, qui intègre des aspects **technico-économiques** et **organisationnels**.

Ce contexte industriel nous a permis de formuler la problématique suivante : **Comment étudier la filière de valorisation des batteries de véhicules électriques d'un point de vue technico-économique, organisationnel et prospectif et ce en tenant compte des différentes complexités ?** Il nous a également permis d'orienter notre positionnement académique, à savoir la nécessité d'une approche **prospective** et **systémique**.

Ainsi, la pensée systémique est un esprit d'étude adapté à notre problématique. Cela suppose de considérer la filière de valorisation des BLIs comme « *système organisationnel complexe en émergence* », et de mobiliser des connaissances provenant de plusieurs disciplines scientifiques, afin de traiter cette problématique selon ses différents points de vue.

La revue de littérature nous a permis d'identifier les travaux existants sur les filières de valorisation et sur la valorisation des BLIs. Ces travaux ne sont pas nombreux et ne répondent pas à tous les aspects de la problématique, ainsi qu'au périmètre de notre étude. Néanmoins, ils nous seront très utiles pour alimenter nos différentes analyses.

Au regard de cet état de l'art, nous avons formulé les trois questions de recherche suivantes :

- 1. Comment modéliser la filière de valorisation des BLIs comme un système organisationnel complexe en émergence ?**
- 2. Comment faire de la prospective sur la filière de valorisation des BLIs ?**
- 3. Comment analyser la gouvernance de la filière de valorisation des BLIs ?**

Pour y répondre, une approche multidisciplinaire a été présentée. Elle mobilise et combine des connaissances et méthodes qui proviennent de différentes disciplines, afin de réaliser des analyses complémentaires et traiter les différents points de vue de la problématique. Etant donné que les trois questions de recherche mobilisent des disciplines différentes, des chapitres distincts leurs sont consacrés. Ces trois chapitres (3, 4 et 5) constituent la deuxième partie de ce rapport de thèse. Une partie que nous allons aborder dans le chapitre suivant.

Chapitre 3 : Modélisation de la filière

Au chapitre précédent, nous avons explicité notre approche afin de répondre à la problématique, en nous appuyant sur les trois questions de recherche identifiées (Figure 3.1). Dans cette approche systémique et pluridisciplinaire, la filière de valorisation des batteries lithium-ion de véhicules électriques est considérée comme un « *système organisationnel complexe en émergence* », permettant ainsi de mobiliser les concepts de la pensée systémique pour la modéliser, comme nous allons le voir à travers ce troisième chapitre.

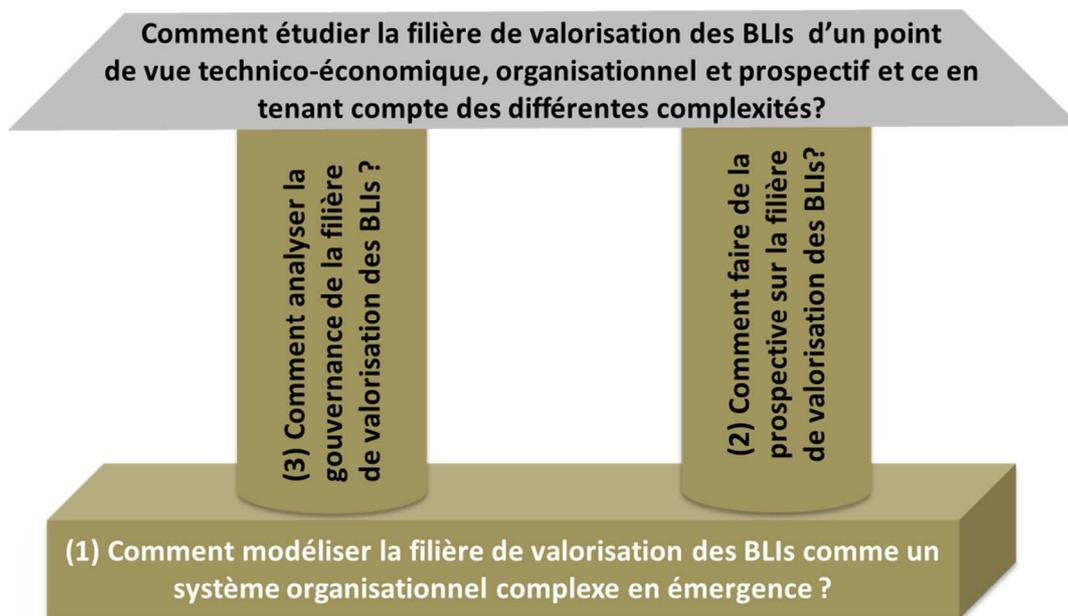


Figure 3.1. **Articulation des trois questions de recherche** pour répondre à la problématique.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la première question de recherche : « **Comment modéliser la filière de valorisation des BLIs comme un système organisationnel complexe en émergence ?** ». Ce chapitre et cette première question de recherche ont pour but :

- **La caractérisation de la filière (parties prenantes, sous-systèmes, etc.)**
- **La compréhension des dynamiques d'évolution de la filière et l'identification des variables clés.** La compréhension des dynamiques d'évolution passe par l'identification des variables qui créent ces dynamiques et leurs simulations. Les variables clés sont celles qui ont le plus d'impact dans ces dynamiques.

Nous avons précédemment mis en lumière les sources de complexité de la filière (2.1.1), dont il faudra en tenir compte lors de la modélisation :

- La présence d'incertitude technologique liée à la filière (technologies des batteries et des procédés de valorisation) et l'incertitude liée à son environnement.
- La multiplicité des parties prenantes qui s'y attachent, avec des perspectives et des attentes différentes.
- La présence d'effets d'interactions entre les éléments qui animent cette filière, avec des délais et des rétroactions.

Ce chapitre est divisé en deux parties. Dans la première, nous introduisons l'état de l'art relatif à notre première question de recherche, à savoir « la modélisation des systèmes organisationnels complexes en émergence ». Dans cet état de l'art, nous allons introduire les méthodes pertinentes pour modéliser la filière et ce, en tenant compte de ses différentes complexités. Dans la seconde partie de ce chapitre, nous illustrons l'application de ces méthodes à la filière de valorisation des BLIs.

3.1 Etat de l'art sur la modélisation des systèmes complexes

L'exercice de modélisation des systèmes relève souvent des pratiques de la recherche opérationnelle (RO) (Pidd, 2004a), ou plutôt de la recherche opérationnelle 'hard' (*hard operational research*). La modélisation des systèmes complexes quant à elle, relève de la pensée systémique et de son interaction avec une recherche opérationnelle dite, 'soft' (*soft operational research*).

En s'appuyant sur notre positionnement académique (2.1.2), c'est dans la pensée systémique et la RO 'soft' que nous allons identifier les méthodes et outils pertinents pour modéliser la filière.

Au chapitre 2, nous avons qualifié la filière de **système organisationnel complexe en émergence**, d'où la nécessité de caractériser ce dernier, notamment ce qui fait son caractère **organisationnel** (parties prenantes) et **émergent**. Pour ce faire, nous allons présenter **la méthode SCOS'M** (*Systemics for Complex Organisational Systems' Modelling*) (Patay, 2008; Patay et al., 2007). C'est une méthode issue de la famille des méthode **SCOS'** (*Systemics for Complex Organisational Systems'*) proposée par (Bocquet et al., 2007). Nous l'avons retenue, puisque elle s'intéresse à la modélisation des systèmes en préconception, à l'instar de celui que nous étudions.

En ce qui concerne la **complexité** du système que nous étudions, nous avons déjà identifié au chapitre 2 (2.1.2.1.2) les **méthodes de structuration des problèmes complexes** pour traiter

la complexité induite par l'incertitude et la multiplicité des parties prenantes. Mingers et White (2010) les définissent comme : « *une famille d'approches de modélisation interactives et participatives, dont le but est d'aider des groupes de diverses compositions pour atténuer une situation problématique complexe, d'intérêt commun* ». Ces dernières agissent en tant que méthodes facilitatrices pour l'atteinte d'une formulation et compréhension commune de ce qui constitue la problématique, à travers le dialogue et le débat (Mingers and White, 2010).

Plusieurs méthodes font partie de cette famille: *Soft Systems Methodology* (SSM), *Strategic Options Development and Analysis* (SODA), *JOintly Understanding Reflecting and NEgotiating strategY* (JOURNEY), etc. La plupart de ces méthodes utilisent la **cartographie cognitive** (*cognitive mapping*), qui a pour but de construire une vision globale et partagée d'un problème complexe, à travers l'enrichissement et la confrontation des visions des parties prenantes et des aspects partiels du problème. **Dans notre travail, nous allons aussi faire appel à la cartographie cognitive.**

Enfin, pour traiter la complexité dynamique de la filière (boucles de rétroaction, non-linéarités, délais), nous faisons appel à la **dynamique des systèmes**. Cette dernière a été justement développée pour la modélisation de ce type de systèmes complexes.

Outre ces méthodes pour traiter la nature complexe, émergente et organisationnelle de la filière, il y a nécessité de les organiser dans une séquence cohérente. Ainsi, nous faisons appel au concept de la '**multimethodology**'¹¹. Ce terme est utilisé pour décrire l'utilisation combinée d'une ou plusieurs méthodes au sein d'une même intervention.

Dans les sections suivantes, nous allons aborder successivement les concepts : *la multimethodology*, *la méthode SCOS'M*, *la cartographie cognitive* et *la dynamique des systèmes*.

3.1.1 La multimethodology

C'est un terme utilisé pour décrire l'utilisation combinée d'une ou plusieurs méthodologies au sein d'une même intervention. Ce concept est un développement important et récent en littérature (Paucar-Caceres, 2010; Pidd, 2004b). **Dans notre travail, nous faisons appel à ce concept pour s'assurer de la cohérence de la combinaison des méthodes citées ci-dessus : SCOS'M, la cartographie cognitive et la dynamique des systèmes.**

¹¹ Nous avons gardé le terme anglais puisque nous n'avons pas trouvé d'équivalent en français.

L'origine de ce concept remonte au développement d'un paradigme au sein de la pensée systémique dans les années quatre-vingts, appelé **la pensée systémique critique** (Jackson, 1985; Mingers, 1984; Ulrich, 1983). L'aspect critique concerne deux dimensions. La première est d'ordre épistémologique, elle questionne la nature et les limites de la connaissance (Checkland, 1978; Churchman, 1979). Le second est d'ordre politique, elle s'intéresse à la nature et au rôle de le RO dans la société (Jackson, 1991; Mingers, 2000a).

De ce paradigme, une méta-méthodologie, connue sous le terme '**Intervention systémique totale**' (*total systems intervention*) a été développée. Elle a pour but, la sélection de la méthode appropriée à utiliser pour les différentes situations (Flood and Jackson, 1991). L'intervention systémique totale représente une sorte de multimethodology classique, puisque ce concept s'intéresse au choix d'une partie ou totalité des méthodes, plutôt que la partition et recombinaison de plusieurs méthodes lors d'une même intervention (Mingers and Gill, 1997).

Le concept de l'intervention systémique totale a été plus tard réorienté et enrichi. Il ne s'agit plus du choix d'une méthode, mais de partitionner des parties de méthodologies et les recombinaison avec d'autres méthodologies, qui peuvent provenir du même ou d'un autre paradigme, le tout dans le cadre d'une même intervention. C'est ce qui est appelé 'Multimethodology' (Mingers, 2000b; Mingers and Gill, 1997) ou 'pluralisme cohérent' (*coherent pluralism*) (Jackson, 1999; Midgley, 2000).

La nature même d'une intervention implique plusieurs phases : appréciation, analyse, évaluation et action, avec des exigences différentes à chaque phase (Mingers and Brocklesby, 1997). Il est normal de conclure que certaines méthodes seraient plus adéquates pour certaines phases que d'autres. D'où la nécessité de rendre les interventions multi-méthodologiques pour une meilleure résolution des problématiques complexes et multidimensionnelles du monde réel (Mingers and Brocklesby, 1997).

Dans les trois sections suivantes, nous présenterons les trois méthodes de modélisation : SCOS'M, la cartographie cognitive et la dynamique des systèmes. Puis, nous allons illustrer leur combinaison multi-méthodologique en conclusion de cet état de l'art (3.1.5).

3.1.2 La méthode SCOS'M

SCOS'M est une méthode qui s'inspirent des travaux de Le Moigne (Le Moigne, 1990, 1999, 1995, 1994), surtout pour la représentation d'un système. Comme nous l'avons annoncé au chapitre 2 (2.1.2.1.2), nous verrons la représentation de notre système selon ses quatre pôles dans ce chapitre (3.2.1.3.1).

La méthode SCOS'M a été développée dans le cadre de l'analyse d'un système logistique en préconception, à savoir la chaîne logistique de l'hydrogène pour le marché des carburants en 2050 (Patay, 2008). Elle a pour but d'en déterminer les limites, décrire ses composantes et identifier les éléments à prendre en compte pour caractériser le problème d'optimisation de la planification du déploiement à 2050 de cette chaîne logistique. Les éléments du problème d'optimisation incluent la fonction 'objectif' à optimiser, les contraintes du problème, ainsi que les variables et paramètres permettant d'exprimer ces fonctions et ces contraintes.

Patay (2008) identifie 5 étapes pour la conduite de la méthode SCOS'M :

- Etape 1 : Isoler le système et ses sous-systèmes pour en définir le périmètre
- Etape 2 : Décrire les phases du cycle de vie du système
- Etape 3 : Décrire, pour chaque phase de son cycle de vie, les attentes portant sur le système en termes de satisfaction et de performance
- Etape 4 : Elaborer les fonctions que doit accomplir le système pour satisfaire ces attentes
- Etape 5 : Déterminer les paramètres et les variables du système permettant de valider la satisfaction des attentes par le système

La combinaison de SCOS'M avec les autres méthodes de modélisation est illustrée à la section (3.1.5), son application à la filière de valorisation des BLIs est illustrée à la section (3.2.1).

3.1.3 La cartographie cognitive

Nous rappelons que nous faisons appel à cette méthode pour **traiter la complexité induite par l'incertitude et la multiplicité des parties prenantes** (2.1.2.1.2). Elle part des éléments de sortie de SCOS'M (parties prenantes) pour **identifier les variables qui créent les dynamiques d'évolution de la filière**. Ces variables seront utilisées en entrée de la **dynamique des systèmes** (simulation des dynamiques d'évolution et identification des

variables clés). Ainsi, elle va agir comme un pont facilitateur entre l'application de SCOS'M et celle de la dynamique des systèmes.

Eden (2004) définit la cartographie cognitive comme « *la mission de cartographier la pensée d'une personne au sujet d'un problème ou d'une question. La carte cognitive est la représentation de la pensée à propos d'un problème qui découle du processus de la cartographie. C'est un réseau de nœuds et de flèches, impliquant des liens de causalités* ».

La figure suivante illustre le concept de la cartographie cognitive, en prenant comme exemple cette première question de recherche.

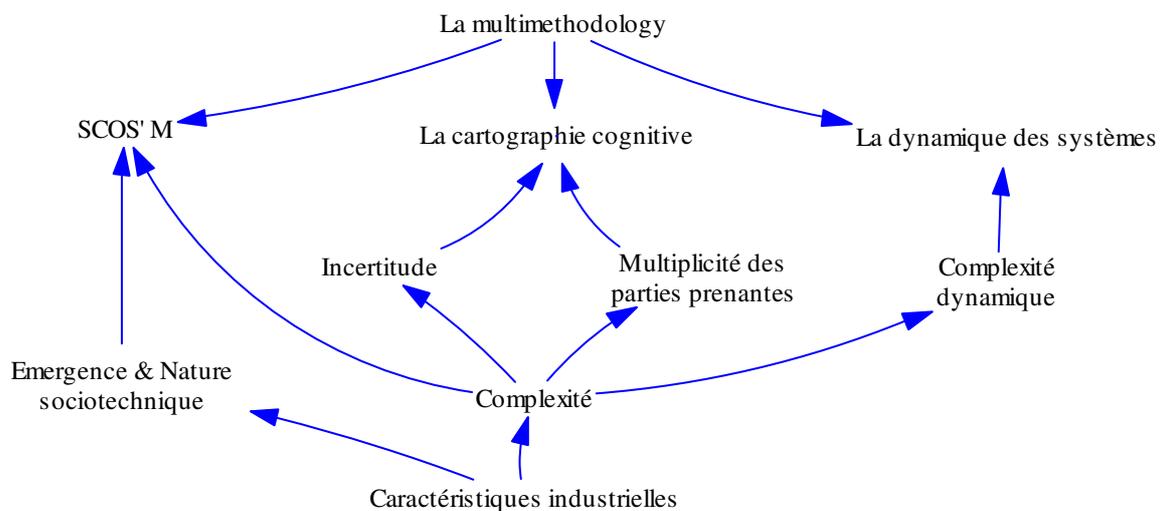


Figure 3.2. Représentation de l'état de l'art pour la modélisation de la filière par une carte cognitive.

L'état de l'art développé dans la première question de recherche a pour but d'identifier les méthodes pertinentes pour modéliser la filière et ce, en tenant compte des différentes complexités. Cet exercice peut être fait sur les autres questions de recherche. Cela permettra d'avoir une vue d'ensemble et détaillée de notre travail. Nous en fournirons la représentation en conclusion de ce chapitre.

La cartographie cognitive peut être utilisée comme étape préliminaire à la dynamique des systèmes (Ackermann et al., 1997; Eden, 1994). Alors, on parle de cartes causales (*cause maps*). Ces dernières sont transformées en diagrammes causaux en indiquant les signes d'influence des liens de causalité¹².

Ainsi, dans notre travail, nous allons utiliser la cartographie cognitive pour faciliter la construction du modèle dynamique des systèmes. C'est justement l'objet de la section suivante.

¹² Voir annexe (B.3) pour la sémantique des diagrammes causaux.

3.1.4 La dynamique des systèmes

Nous rappelons que nous faisons appel à la dynamique des systèmes (DS) pour **traiter la présence d'une complexité dynamique dans ce qui anime l'évolution de la filière** (2.1.2.1.2). L'application de la méthode DS pour la simulation des dynamiques d'évolution de la filière; facilitée par la cartographie cognitive, a pour but la compréhension des mécanismes de cette évolution et l'identification des variables clés, ces dernières servent à définir les scénarios d'évolution de la filière (chapitre 4).

La DS est une méthodologie systémique adaptée pour l'analyse des systèmes complexes à grande échelle où des facteurs hétérogènes (économiques, technologiques, volumiques, etc.) sont en interaction. Elle fournit un cadre conceptuel utile, intégrant des équations différentielles non-linéaires avec des interactions complexes (Forrester, 1961). Elle englobe la modélisation analytique et la simulation, puisant ses racines dans la pensée systémique. L'objectif est d'analyser, comprendre et prédire le comportement d'un système complexe dans le temps, en analysant ses facteurs de changement (Sterman, 2000).

Donnadieu et Karsky (2002) définissent la DS comme une science de changement et d'évolution. Elle s'intéresse à la compréhension des phénomènes et leurs causes, identifiant les facteurs qui créent le changement, ou autrement s'y opposent. L'approche DS est un processus itératif qui s'articule autour des cinq étapes suivantes (Sterman, 2000) :

1- Articulation du problème: les limites du système sont identifiées par la définition de l'objectif de recherche et les facteurs à inclure et exclure. Elle comprend également la définition de l'horizon temporel.

2- Formulation des hypothèses dynamiques : les variables sont mises en relation dans une analyse causale, en utilisant des outils comme : les *diagrammes causaux*, les *diagrammes stock et flux* ou un autre outil de représentation.

3- Formulation d'un modèle de simulation : les diagrammes stock et flux sont implémentés pour la simulation, en spécifiant les conditions initiales, les paramètres et les équations entre les variables. Des outils de simulation (*PowerSim*, *i-think*, *Vensim*, *Stella*) sont utilisés dans cette étape.

4- Test du modèle: Plusieurs tests sont possibles: simulation des scénarios extrêmes, analyse de la sensibilité des variables, comparaison avec le comportement passé, etc.

5- Formulation et évaluation des stratégies: les incertitudes sont modélisées à travers des scénarios, les stratégies sont formulées et évaluées. Les résultats sont renforcés par des analyses de sensibilité.

La clarification des concepts de la DS (diagramme causal, diagramme Stock & flow, boucle de rétroaction stabilisatrice, boucle de rétroaction explosive, variable auxiliaire, stock, etc.) est faite en annexe (B.3).

Comme il est mentionné dans la Figure 3.3, le processus de modélisation DS est itératif. En acquérant plus de connaissances sur le comportement du système à chaque étape, des ajustements et des modifications sont portés aux étapes précédentes.

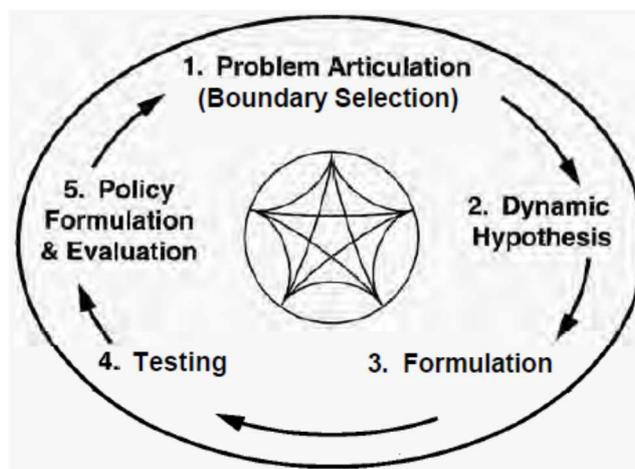


Figure 3.3. Etapes de construction d'un modèle DS (Sternman, 2000).

Dans notre travail, la méthode DS va exploiter la cartographie cognitive pour identifier les facteurs, puis les variables à prendre en compte pour construire les diagrammes causaux. L'application de ces deux méthodes est illustrée à la section (3.2.2).

3.1.5 La multimethodology pour la modélisation de la filière

Dans les trois sections précédentes, nous avons identifié les méthodes suivantes à mettre en œuvre lors de la modélisation:

- SCOS'M pour la caractérisation de la filière ;
- La cartographie cognitive pour l'identification des facteurs, puis des variables qui créent les dynamiques d'évolution de la filière ;
- La DS pour la simulation de ces dynamiques et l'identification des variables clés.

L'élément de transition entre SCOS'M et la cartographie cognitive est la liste des parties prenantes. Par conséquent, pour les besoins de la modélisation, **il n'est pas nécessaire**

d'entamer la méthode SCOS'M, au-delà de l'étape d'identification des parties prenantes (étape 3), comme le montre la Figure 3.4. Les étapes 4 & 5 ont pour but d'identifier les éléments du problème d'optimisation. Etant en prospective sur un système en préconception, en présence d'interactions, l'optimisation n'est pas pertinente (Serman, 1991).

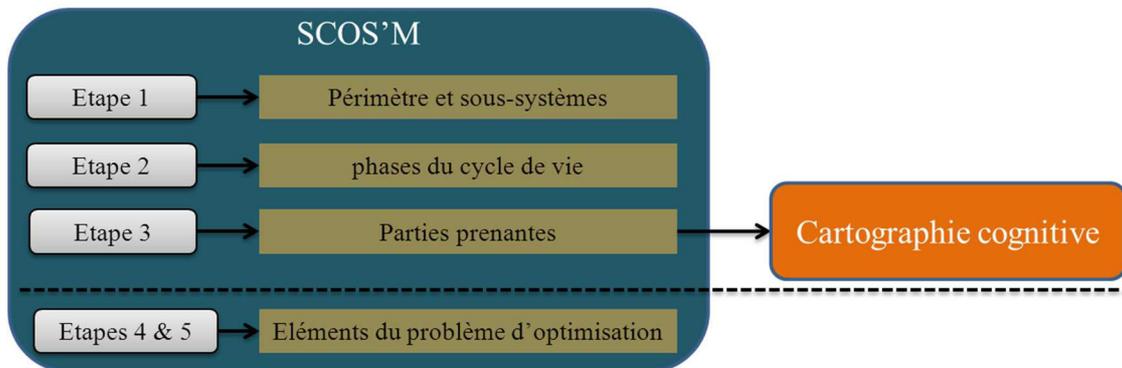


Figure 3.4. Combinaison de SCOS'M avec la cartographie cognitive.

La cartographie cognitive va exploiter la liste des parties prenantes identifiées par la méthode SCOS'M afin d'identifier une liste préliminaire de facteurs par lesquels elles influencent, ou sont influencées dans cette filière. Cette liste préliminaire de facteurs est traduite progressivement en variables **créant les dynamiques d'évolution**, mises en relation dans des diagrammes causaux par la cartographie cognitive. **Ainsi, la cartographie cognitive sera incorporée dans les deux premières étapes de la DS.** Les étapes 3 & 4 de la DS serviront à la simulation du modèle et l'identification des variables clés. L'étape 5 de la DS concerne la construction des scénarios et l'évaluation des stratégies, c'est l'objet du chapitre 4.

La figure suivante récapitule la combinaison de ces trois méthodes au service de la modélisation, en mettant en lumière les éléments de transition entre ces différentes méthodes.

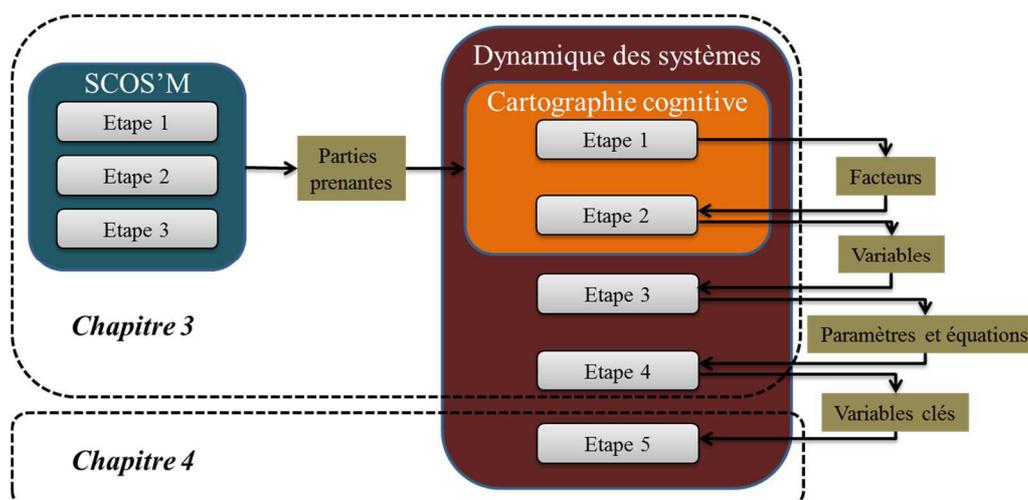


Figure 3.5. Articulation des trois méthodes de modélisation

A présent, nous allons appliquer ces méthodes pour la modélisation de la filière.

3.2 Application à la modélisation de la filière

Nous mobilisons l'état de l'art décrit ci-dessus afin de modéliser la filière. Le fil conducteur de cette application est la multimethodology. Nous allons exploiter d'une manière combinée les différents concepts introduits afin de répondre aux objectifs de la modélisation, à savoir :

- **La caractérisation de la filière (parties prenantes, sous-systèmes, etc.)**
- **La compréhension des dynamiques d'évolution de la filière et l'identification des variables clés.**

Ainsi, nous allons faire appel aux méthodes SCOS'M, cartographie cognitive et DS, respectivement. C'est l'objet des deux sections suivantes.

3.2.1 Caractérisation de la filière: Application de SCOS'M

Nous rappelons que nous allons appliquer les trois premières étapes de SCOS'M pour caractériser notre système étudié, en identifiant ses sous-systèmes, les différents flux entre eux, ses phases d'évolution et le plus important, ses parties prenantes. Cette application est explicitée dans les paragraphes suivants.

3.2.1.1 Périmètre du système (Etape 1)

La Figure 3.6 illustre le système d'intérêt et ses sous-systèmes.

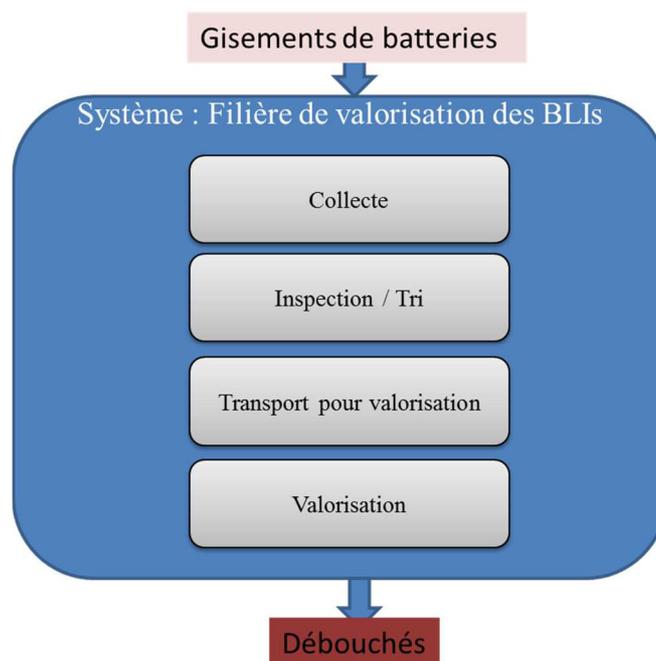


Figure 3.6. Limitation du système étudié et sa décomposition initiale en sous-systèmes.

Nous avons considéré le système global « filière de valorisation des BLIs », puis nous l'avons décomposé en sous-systèmes fonctionnels. Pour ce faire, nous nous sommes appuyés sur la caractérisation des filières de valorisations exposée à la section (2.2.1), ainsi que des workshops avec des experts industriels concernés¹³.

Nous avons distingué les sous-systèmes de *collecte*, *Inspection/Tri*, *transport pour valorisation* et *valorisation*. Par la suite, nous avons décomposé le sous-système nommé: valorisation. Dans l'environnement de notre filière, nous avons identifié les systèmes « *gisements de batteries* » et « *débouchés* ». Ces derniers seront également considérés en tant que systèmes eux-mêmes décomposables en sous-systèmes, via leurs interactions avec notre système « filière de valorisation des BLIs ».

3.2.1.1.1 Décomposition du sous-système « valorisation »

Nous rappelons que nous avons distingué deux **scénarios de valorisation** : la réutilisation et le recyclage. La réutilisation se décline en deux **options de valorisation** : le remanufacturing et le reconditionnement. Chacune de ces options (remanufacturing / reconditionnement / recyclage) se présente avec plusieurs **procédés technologiques** possibles.

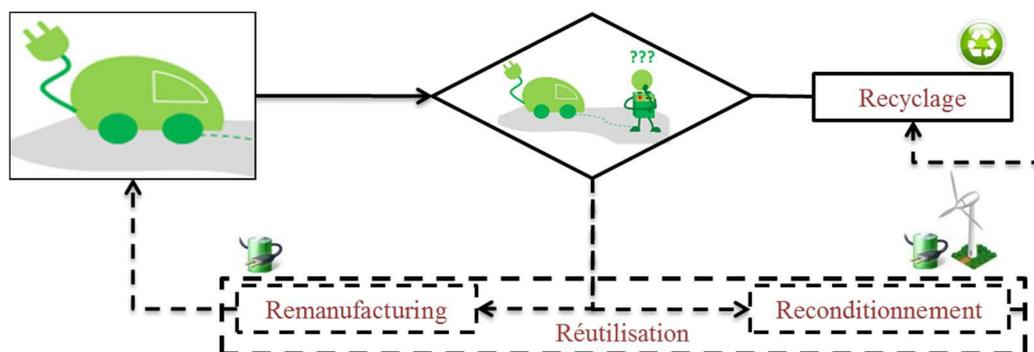


Figure 3.7. Options de valorisations possibles pour les BLIs

Ainsi, le sous-système de valorisation se décompose à son tour en sous-systèmes de **réutilisation** et de **recyclage**. Le sous-système de réutilisation se décompose lui-même en sous-systèmes de remanufacturing et de reconditionnement, chacun pouvant à son tour être décomposé en ses sous-systèmes de procédés. Le sous-système de recyclage peut également se décomposer en sous-systèmes de procédés.

¹³ Il s'agit d'un groupe de travail interne à notre partenaire industriel, regroupant des experts de divers domaines : recyclage, réparation, systèmes de stockage, transport, véhicules électriques, réseau de vente, etc.

3.2.1.1.1 Décomposition du sous-système « réutilisation »

Le scénario de valorisation « réutilisation » se décline en deux options : le **remanufacturing** et le **reconditionnement**. L'élément discriminant de cette classification est l'application de la réutilisation, par conséquent le changement ou non du système de gestion de la batterie. On distingue la réutilisation automobile pour l'usage d'origine (remanufacturing) et le reste des applications en **usage seconde vie (2nde vie)** (reconditionnement). D'un point de vue maturité industrielle, des projets pilotes (4R Energy) ou de recherche (AbattReLife, ELIBAMA) concernent le reconditionnement, mais nous n'avons pas connaissance de telles initiatives pour le remanufacturing.

Le remanufacturing peut être réalisé suite à une défaillance de la BLI pendant sa durée de vie automobile ou à sa fin de vie (perte de capacité). Le premier cas de figure (défaillance) **n'est pas pris en compte dans notre travail**, du fait de la faiblesse des volumes concernés. Les anomalies nécessitant un remanufacturing représentent une proportion très faible du parc, moins de 0,25% selon les experts que nous avons rencontrés et les chiffres communiqués par les constructeurs. Un responsable chez Nissan déclarait : « Sur les 45 000 véhicules sur les routes en Europe, seules 3 batteries ont dû être changées » (Fabry, 2015). En ce qui concerne le remanufacturing des BLIs en fin de vie, nous prenons l'hypothèse suivante :

Hypothèse (3.1) : le remanufacturing des BLIs à leur fin de vie automobile n'est pas considéré dans ce travail. Les exigences en autonomie, fiabilité et sécurité rendent une telle démarche moins réaliste.

Dans le **reconditionnement pour l'usage 2nde vie**, il s'agit de démonter la batterie à un niveau défini, tester et éventuellement remplacer des éléments défectueux, les réassembler dans une nouvelle configuration et ajouter un système de gestion (Ahmadi et al., 2014a).

En ce qui concerne les procédés du reconditionnement, ils restent encore à définir. La question principale est la définition du bon niveau de démontage de la batterie. Nous rappelons le schéma générique d'une BLI dans la figure suivante.

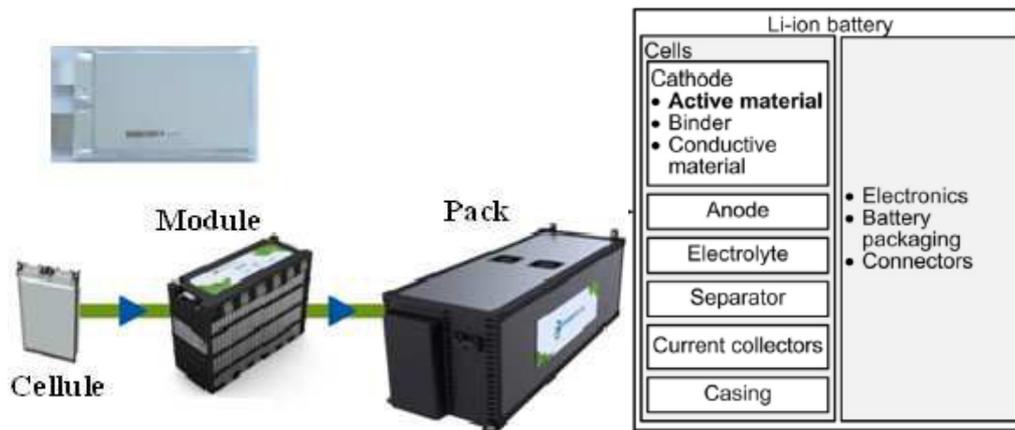


Figure 3.8. Décomposition et Composition d'une batterie. (Swart et al., 2014; Väyrynen and Salminen, 2012).

Ainsi, pour le reconditionnement de la BLI. On peut être amené à :

- Démontez juste le pack sans toucher la partie électrochimique, pour remplacer la partie électrique et support;
- Démontez les modules entre eux, pour remplacer certains ;
- Démontez les modules en cellules afin de remplacer certaines ;
- Démontez les cellules afin d'éliminer la couche solide d'électrolyte qui se dépose sur la cathode, responsable de la perte de capacité de la batterie (Ramoni and Zhang, 2013). Ce procédé est aussi appelé régénération de cellule, comme procédé de recyclage (Ganter et al., 2014; Georgi-Maschler et al., 2012).

Pour la décomposition du sous-système de reconditionnement en sous-systèmes de procédés, nous ne disposons pas d'éléments quantitatifs précis (coûts, bénéfices, avantages, etc.) par procédé, qui comme nous venons de le montrer, ne sont même pas encore définis. Ainsi, **La modélisation du reconditionnement est faite d'une manière générique, indépendamment des procédés de reconditionnement, qui devront être ultérieurement définis (non matures aujourd'hui).**

Dans le sous-système de réutilisation, nous retenons uniquement celui du reconditionnement. Son évaluation technico-économique sera faite en abstraction du choix du procédé (Figure 3.9). Le sous-système de recyclage sera abordé juste après.

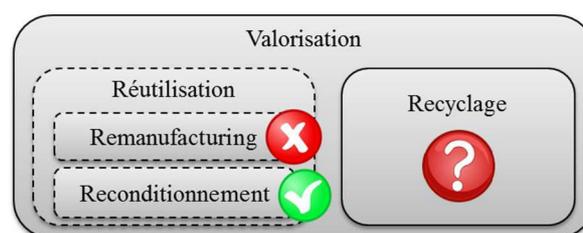


Figure 3.9. Décomposition du sous-système de réutilisation.

3.2.1.1.1.2 Décomposition du sous-système « recyclage »

Le scénario et option de valorisation « recyclage » est au stade du démarrage industriel, il existe encore des pays sans aucune unité de recyclage de BLIs (Zeng et al., 2013). Les procédés et structures de recyclage conçus initialement pour les petites batteries (téléphones, outils, etc.), sont inadaptés pour le traitement des batteries VE, du fait de leurs poids, compositions et dangerosité (Hoyer et al., 2011).

L’objectif du recyclage est la récupération de la valeur contenue dans les matières de la BLI. Ces matières se retrouvent à des niveaux différents de la batterie (électrode, cellule, pack), dans des proportions différentes (Figure 1.6, Figure 1.8), et avec une contribution différente à cette valeur récupérée. Par conséquent, des opérations d’extraction, séparation et purification de ces matières sont nécessaires. La complexité du procédé de recyclage est fonction des matières que l’on souhaite récupérer et de leur localisation dans la BLI. Kwade (2010) a identifié 4 opérations de traitement élémentaires, qui peuvent être combinées de plusieurs manières et forment plusieurs alternatives de procédés (Figure 3.10).

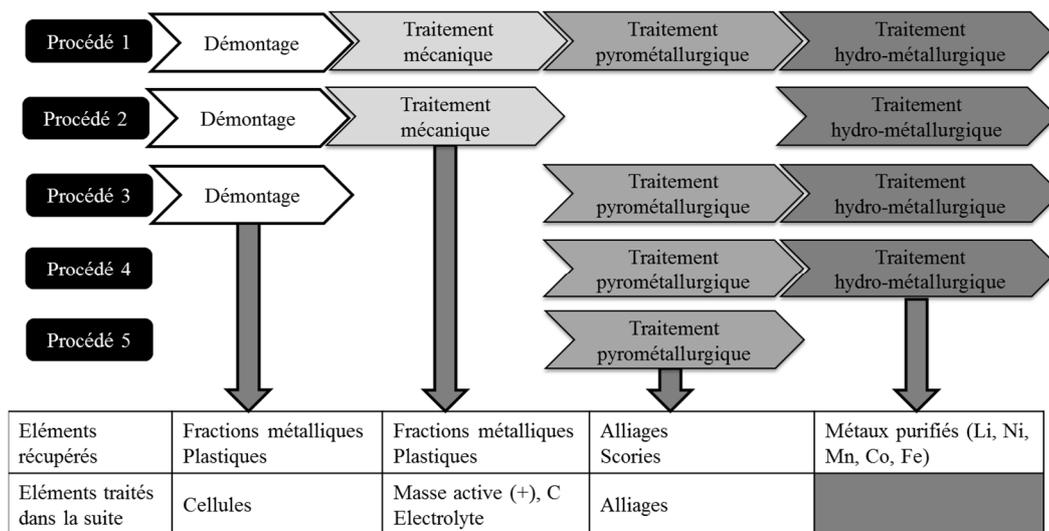


Figure 3.10. Processus de recyclage possibles. Adapté de (Kwade, 2010; Sangwan and Jindal, 2013).

Au final, il existe cinq procédés possibles (en lignes sur la figure). A l’issue de chaque opération, certains éléments seront valorisés, d’autres seront traités dans les opérations ultérieures du procédé. A titre d’exemple, le procédé « 2 » est composé de trois opérations : Démontage + traitement mécanique + traitement hydro-métallurgique. Lors du démontage, la partie électrochimique est séparée du reste de la batterie. A la fin du démontage, on obtient des **fractions métalliques et plastiques** qui sont vendues à des filières de valorisation spécifiques, et les **cellules** qui subiront un traitement mécanique. Après ce dernier, on obtient toujours des fractions métalliques et plastiques (qui sont valorisées de la même manière),

l'électrolyte et un mélange des deux masses actives (un oxyde de métal-lithium et du graphite), appelé aussi **black mass**. Les métaux contenus dans la black mass sont séparés lors de l'hydrométallurgie. L'annexe (B.1) fournit un descriptif détaillé de ces quatre opérations élémentaires.

Cette classification en procédés et opérations (Figure 3.10) est appuyée par le panorama d'acteurs industriels actuels. Le tableau suivant récapitule ceux qui ont déjà signé des contrats avec des constructeurs ou sont partenaires dans des projets de recherche.

Société de recyclage	Procédé	Contrats ou projet de recherche
Umicore	Démontage, Traitement Pyro, Traitement Hydro ¹⁴	Toyota, Renault /Nissan, Tesla, ELIBAMA
SNAM		PSA, BMW, Volkswagen, ELIBAMA
Recupyl	Démontage, Traitement Mécanique, Traitement Hydro	projet Cyclade

Tableau 3.1. Etat des lieux des acteurs de recyclage des BLIs.

En prenant en compte, les procédés industrialisés (Tableau 3.1), l'objectif réglementaire de recycler les batteries à hauteur minimale de 50% et les besoins en matières premières, Nous formulons, en accord avec notre partenaire industriel, l'hypothèse suivante :

Hypothèse (3.2) : Seulement deux procédés sont considérés pour la suite de ce travail. Il s'agit des procédés 2 et 3, que nous appelons désormais:

Procédé 1 : Démontage, traitement mécanique, traitement hydro-métallurgique

Procédé 2 : Démontage, traitement pyrométallurgique, traitement hydro-métallurgique

Nous avons écarté les autres procédés (Procédé 1, 4 et 5) car nous estimons qu'ils présentent moins d'opportunités de développement, considérant les raisons suivantes :

- Procédé 1 : Présente des investissements non justifiés (4 opérations).
- Procédé 4 : On ne peut pas se permettre de s'affranchir de l'opération de démontage, qui permet d'augmenter le taux de recyclage et de réduire la taille des éléments à mettre dans le four de pyrolyse.
- Procédé 5 : Avec l'opération de pyrométallurgie uniquement, le taux de recyclage réglementaire ne serait pas atteignable.

Ainsi, nous décomposons le sous-système de recyclage en deux sous-systèmes : « procédé 1 » et « procédé 2 ». Son évaluation technico-économique est faite selon ces deux procédés.

¹⁴ Le procédé de SNAM inclue une opération de broyage après la pyrométallurgie.

3.2.1.1.2 Décomposition des systèmes « gisements de batteries » et « débouchés »

Les gisements représentent les différentes sources qui peuvent alimenter notre filière pour le traitement des BLIs. Ils incluent les véhicules accidentés, les BLIs issues des véhicules en fin de vie, les BLIs en pannes (ne fonctionnant pas) ou en fin de vie (perte de capacité), les BLIs utilisées en 2nde vie et les petites batteries portables. Les BLIs à utiliser pour le stockage stationnaire, hors BLIs en 2nde vie, ne sont pas considérées dans notre étude. Aujourd'hui, ces marchés sont inexistantes, le stockage d'énergie est principalement hydraulique.

Enfin, le système « débouchés » de cette filière se décompose en applications 2nde vie et en marchés des matières recyclées.

Au final, nous obtenons la décomposition suivante du système que nous modélisons.

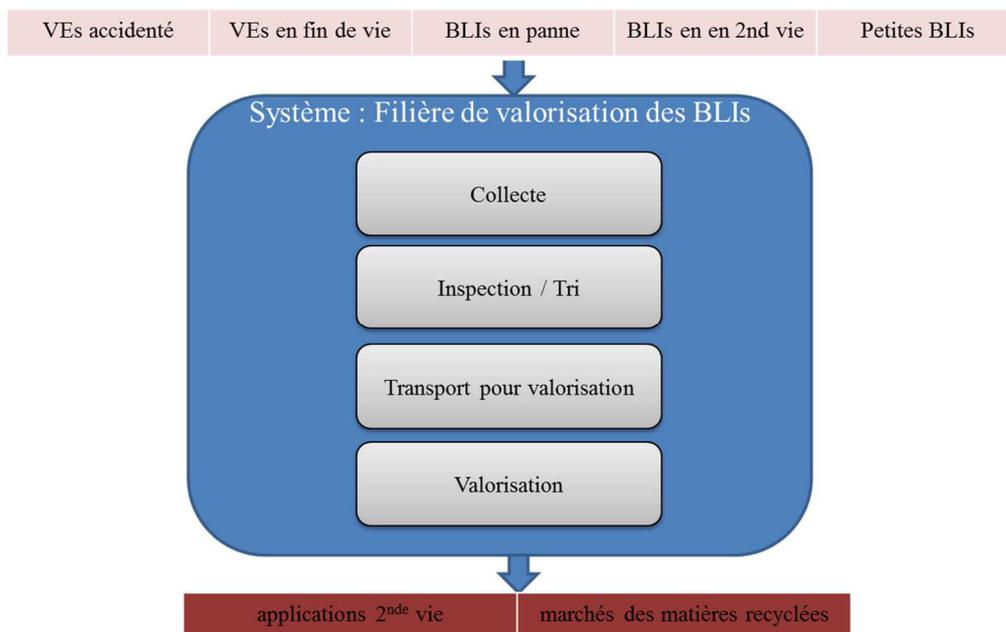


Figure 3.11. Limitation du système étudié et sa décomposition finale en sous-systèmes.

Nous avons identifié les flux potentiels entre les sous-systèmes en annexe (B.2)

3.2.1.2 Phases du cycle de vie (Etape 2)

Classiquement, nous avons considéré quatre phases dans le cycle de vie du système.



Figure 3.12. Les phases du cycle de vie de la filière

La **Phase d'étude de déploiement** correspond à notre travail de recherche. C'est dans cette dernière que nous investiguerons le système dans ses phases subséquentes. La **phase de**

déploiement correspond à l'installation des unités de traitement du système, engendrant des coûts d'investissements. Par conséquent, elle fait partie de notre étude par son impact sur notre phase d'étude de déploiement. La **phase d'exploitation** est la phase principale du système, ayant la plus longue durée de vie. C'est cette dernière qui engendre la transformation des flux financiers, de BLIs et de matières. Naturellement, elle fait partie de notre étude par son impact sur notre phase d'étude de déploiement. La **phase de démantèlement** est moins importante à étudier, puisque les installations vont probablement être converties pour de nouvelles activités.

Ainsi, notre travail de recherche se situe dans la phase d'étude de déploiement du système. Il considère le système dans ses phases de déploiement et d'exploitation.

3.2.1.3 Attentes du système principal « Filière de valorisation BLIs » (Etape 3)

Deux méthodes complémentaires sont utilisées dans cette étape. La première repose sur la représentation d'un système selon quatre pôles (Figure 3.13).

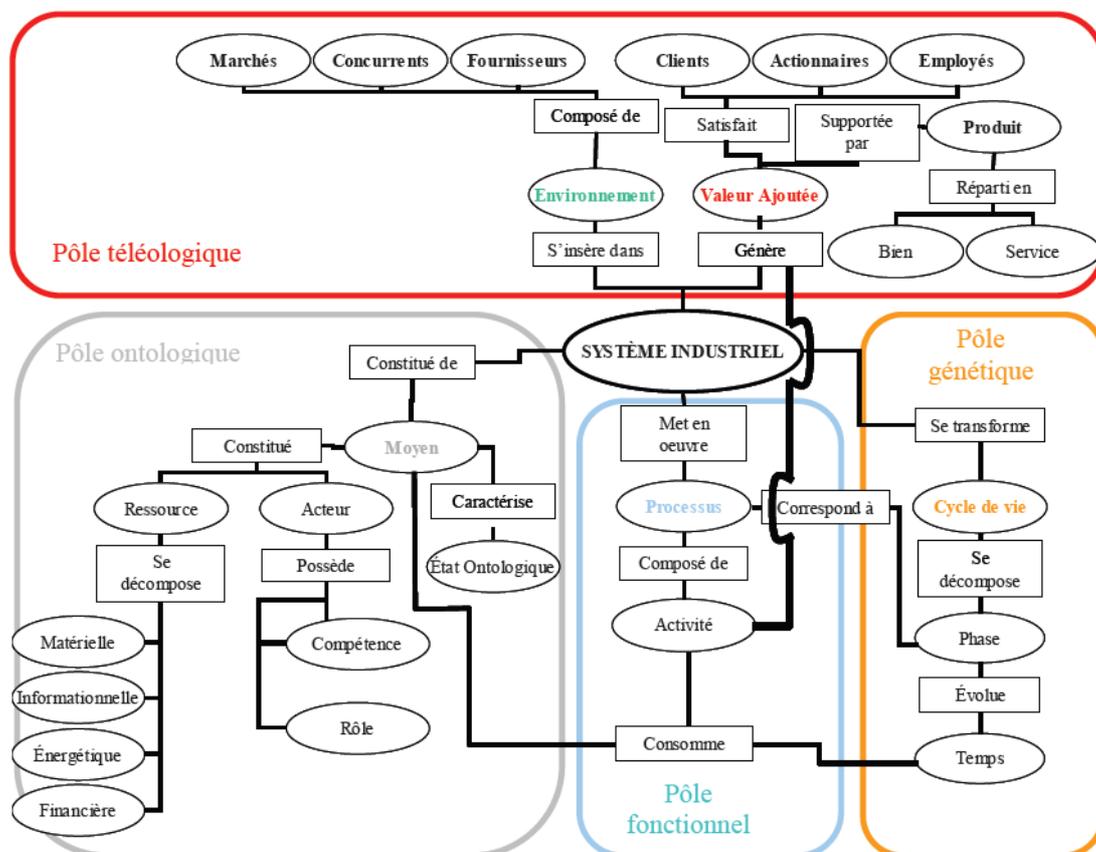


Figure 3.13. Décomposition d'un système industriel selon 4 pôles (Perron, 2002).

La représentation du système, selon les pôles téléologique, ontologique et génétique, sert à structurer l'environnement du système, notamment **les parties prenantes**. Cela facilitera

l'expression des attentes du système principal dans son environnement (pôle fonctionnel), à travers la deuxième méthode qui est le diagramme de « la bête à corne ».

3.2.1.3.1 Représentation du système industriel selon 4 pôles

Nous illustrons cette représentation de notre filière aux tableaux suivants.

Le système global s'insère dans un environnement composé de :	
Marchés	<ul style="list-style-type: none"> - Recyclage: déchets électroniques, matières plastiques, VHU, ...etc. - Stockage d'énergie - Transport et mobilité
Concurrents	<ul style="list-style-type: none"> - Fabricants de nouvelles batteries - Sociétés minières
Fournisseurs	<ul style="list-style-type: none"> - Metteurs sur le marché des BLIs : Constructeurs automobiles, fabricants de batteries - Garagistes - Fournisseurs de VHU (démolisseurs, assureurs, fourrières, ..) - Utilisateurs applications 2^{de} vie
L'humanité	<ul style="list-style-type: none"> - Le législateur - Les organismes de protection de l'environnement
Le système global génère une valeur ajoutée qui satisfait :	
Clients finaux	<ul style="list-style-type: none"> - Metteurs sur le marché des BLIs: conformité à la réglementation, optimisation des coûts/bénéfices - Utilisateurs matériaux recyclés: disponibilité des matériaux de qualité - Utilisateurs 2^{de} vie: batteries moins chères et fiables - Autres filières de recyclage : nouveaux gisements - L'environnement : respect des exigences environnementales
Actionnaires	<ul style="list-style-type: none"> - Profit
Employés	<ul style="list-style-type: none"> - Salaire, sécurité
L'humanité	<ul style="list-style-type: none"> - Respect de l'environnement, traitement de déchets dangereux

Tableau 3.2. Pôle téléologique du système.

Le système global est constitué de moyens :	
Ressources	<ul style="list-style-type: none"> - Matérielles : système de collecte, système d'inspection / tri, système de transport, système de valorisation - Energétiques: somme des ressources des sous-systèmes - Informationnelles : répartition géographique des gisements, des unités de traitement - Financières : coût de chaque sous-système, coût d'interaction entre les sous-systèmes
Acteurs	<ul style="list-style-type: none"> - Logisticiens - Reconditionneurs - Recycleurs

Tableau 3.3. Pôle ontologique du système.

Le système global se transforme selon son cycle de vie qui se décompose en :	
Phases	<ul style="list-style-type: none"> - Etude de déploiement - Déploiement - Exploitation - Démantèlement

Tableau 3.4. Pôle génétique du système.

Comme pour notre système « filière de valorisation des BLIs », nous sommes en phase d'étude de déploiement, les aspects fonctionnels et activités de notre système sont à concevoir. Pour ce faire, nous partons du besoin fondamental « à qui, sur qui et dans quel but » (bête à corne).

3.2.1.3.2 Expression du besoin fondamental : Bête à cornes

L'expression des attentes du système principal sont synthétisées à travers celle du besoin fondamental du système. L'expression de ce dernier est validée en répondant aux trois questions de la bête à cornes (Figure 3.14).

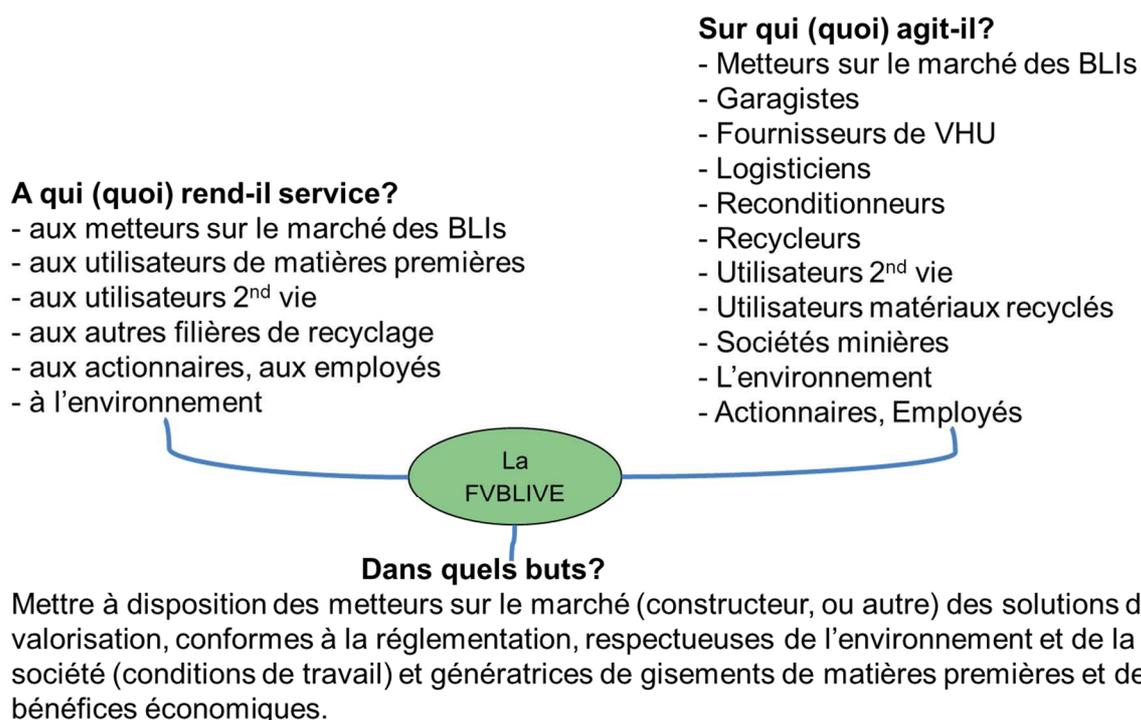


Figure 3.14. Bête à cornes du système pour l'expression du besoin fondamental

Ce système existerait dans le but d'apporter des solutions de traitement aux BLIs en fin de vie, permettant de se conformer à la réglementation d'une part et d'optimiser les bénéfices/coûts de ce traitement d'autre part.

3.2.1.4 Conclusions sur l'application de SCOS'M

SCOS'M nous a permis de bien caractériser notre système étudié. Nous avons identifié ses sous-systèmes, les différents flux entre eux et ses phases d'évolution. Enfin, au travers de la structuration des quatre pôles (Tableau 3.2, Tableau 3.3, Figure 3.14), nous avons identifié ses parties prenantes qui sont les suivantes :

Constructeurs automobiles, Fabricants de batteries, Garagistes, Fournisseurs de VHU, Logisticiens, Recycleurs, Reconditionneurs, Utilisateurs matériaux recyclés, Utilisateurs 2^{nde} vie, Autres filières de recyclage, Sociétés minières, Actionnaires, Employés, Législateur, Environnement.

Cette liste de parties prenantes nous sert de transition, entre cette première analyse avec SCOS'M et l'analyse suivante avec la dynamique des systèmes, facilitée par la cartographie cognitive, voir la Figure 3.5.

3.2.2 La compréhension des dynamiques d'évolution de la filière et l'identification des variables clés: Application de la cartographie cognitive et de la DS

Nous rappelons que nous utilisons la DS ; facilitée par la cartographie cognitive dans ses deux premières étapes, pour la compréhension des dynamiques d'évolution de la filière et l'identification des variables clés. Cela passe par l'identification des variables qui créent les dynamiques d'évolution (étapes 1 & 2) et leurs simulations (étape 3). Puis, une analyse de sensibilité nous permettra d'identifier les variables clés (étape 4), à prendre en compte lors de la construction des scénarios d'évolution de la filière (étape 5, chapitre 4). Ainsi, dans cette section, nous allons mettre en œuvre les quatre premières étapes de la méthode DS.

3.2.2.1 Articulation du problème

Le but de cette première étape est de définir l'objectif de la modélisation et son périmètre, en termes d'horizon temporel et de facteurs à inclure.

Dans ce présent chapitre, l'intérêt est de modéliser les lois du comportement internes de notre système, ainsi que de faire une étude de sensibilité des variables exogènes pour l'identification des variables clés. Le prochain chapitre introduira sur la base des variables clés, les notions de « scénarios » pour simuler les dynamiques d'évolutions de la filière.

Pour l'élaboration de notre modèle, nous reprécisons son périmètre, défini avec notre partenaire industriel. Ainsi, nous considérons un périmètre géographique européen. Le modèle est simulé à partir de 2010 (premières ventes de véhicule électriques (VE)) jusqu'à 2050. Cela est consistant avec la littérature sur les ventes de VE et la consommation des métaux (IEA, 2012a; Miedema and Moll, 2013; Pasaoglu et al., 2012). Dans cet horizon, les BLIs seront la technologie de référence à valoriser jusqu'à au moins 2040, et au-delà avec les batteries post BLIs.

Dans un premier temps, nous commençons par identifier les **facteurs** qui contribuent à la dynamique de la filière. Ces facteurs seront ultérieurement décomposés en **variables** du modèle à l'étape 2 de la DS.

En ce qui concerne ces facteurs, nous nous sommes intéressés dans un premier temps, à lister pour chacune des parties prenantes, les facteurs par lesquels ils influencent ou sont influencés dans cette filière. Le but étant de se prémunir contre la négligence de certains effets qui régissent l'évolution de la filière, qu'ils soient endogènes ou exogènes.

Partie prenante	Facteurs
Constructeurs	Demande en électromobilité, ventes VE, technologie des BLIs, rentabilité du recyclage, rentabilité du reconditionnement ; rentabilité de la fin de vie de la BLI.
Fabricants batteries	Criticité des matières, cours des matières premières, technologie des BLIs ;
Garagistes	Localisation, taux de défaillance
Fournisseurs de VHU	Localisations, volume VHU électriques ; taux accidents
Logisticiens	Localisation centres de regroupements, coûts, émissions CO ₂ ; réglementation ADR
Recycleurs	Localisations, procédés, coûts, émissions CO ₂ , rendements, capacités, composition des batteries, volume à traiter, cours des matières premières
Reconditionneur	Localisations, procédés, coûts, émissions CO ₂ , capacités, technologie des BLIs, volume à traiter, valeur résiduelle des BLIs, taille du marché de la réutilisation 2 nd e vie
Utilisateurs matériaux recyclés	Exigences de qualité, demande, prix d'achats, cours des matières premières, criticité des matières premières
Utilisateurs 2 nd e vie	Localisations, taille du marché de la réutilisation 2 nd e vie, prix d'achat de la batterie reconditionnée, caractéristiques des batteries ;
Autres filières de recyclage	Localisation, mutualisation des flux, prix d'achat des déchets BLIs
Sociétés minières	Production, demande, criticité et prix des matières premières
Actionnaires	Rentabilité du recyclage, rentabilité du reconditionnement ;
Employés	Sécurisation des postes de travail, salaires

Législateur	Pénalité de non-respect de la directive 'recyclage batterie', réglementation ADR
L'environnement	Bilan environnemental de la filière

Tableau 3.5. Identification des facteurs du système.

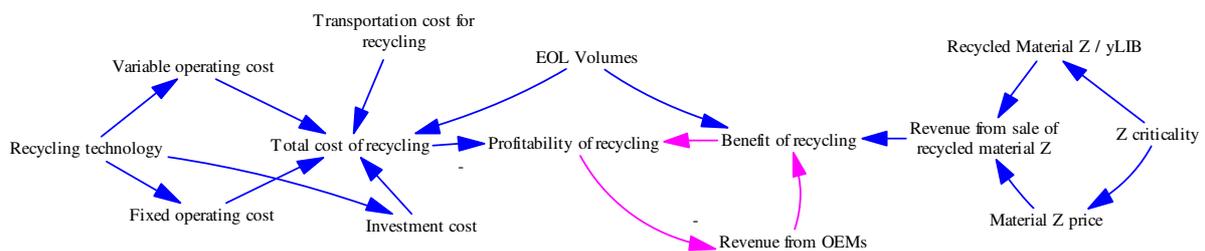
Nous avons fait le choix de ne pas inclure les facteurs relatifs à la localisation des parties prenantes. Cela est justifié par notre positionnement de ne pas traiter les aspects logistiques (2.1.1). Nous avons également fait le choix de ne pas inclure le bilan environnemental de la filière (émissions CO₂ ou autre). Cela s'explique par le niveau de maturité actuel des procédés, rendant une telle analyse difficile voire impossible.

L'objectif de cet exercice (Tableau 3.5) est de requérir, par partie prenante, les facteurs d'influence. Ces derniers seront ensuite fusionnés et enrichis avec la technique de la cartographie cognitive, à travers des workshops ciblés avec des experts sur les batteries, l'électromobilité, le recyclage, l'activité minière et le transport des déchets.

3.2.2.2 Formulation des hypothèses dynamiques

Dans cette étape, nous nous avons appliqué la cartographie cognitive pour mettre en relation les facteurs identifiés, les enrichir, les discrétiser éventuellement en variables et construire les diagrammes causaux.

D'une manière itérative et à partir d'une analyse causale, les relations entre les différents facteurs sont construites, jusqu'à la granularité de leurs variables afin d'aboutir aux diagrammes causaux (élément fondamental du modèle). Nous avons procédé d'une manière progressive, en partant d'un facteur et le mettant en relation avec les autres successivement. Prenons l'exemple du facteur : **rentabilité du recyclage** (*Profitability of recycling*).

Figure 3.15. Diagramme causal de la rentabilité du recyclage¹⁵. 'Extrait du modèle DS'

Sur cet exemple, nous avons mis en évidence **une boucle de rétroaction stabilisatrice** (en rose sur la Figure 3.15), que nous expliquons comme suit : si le revenu de la revente des matières recyclées n'est pas suffisant pour assurer la rentabilité du recyclage, c'est le

¹⁵ Voir annexe (B.3.1) pour l'explication des boucles et des signes (+), (-). L'absence d'un signe sur un arc donné, signifie que c'est un effet positif (+).

constructeur qui compensera ce déficit. Inversement, si le revenu de la revente des matières recyclées est suffisant, le constructeur pourra même recevoir une rétribution de ce revenu. La notion de boucle de rétroaction revêt une extrême importance dans ce type de modélisation, puisque le comportement du modèle devient imprévisible avec leurs présences. D'où l'intérêt de les simuler.

Par la suite, nous nous sommes intéressés aux autres facteurs, à commencer par la criticité d'une matière Z.

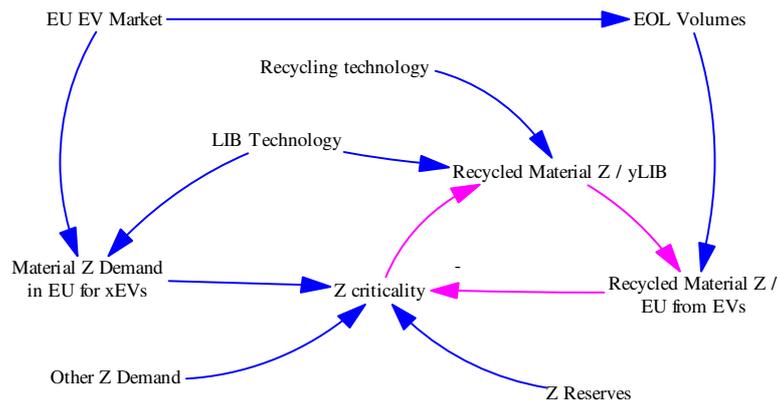


Figure 3.16. Diagramme causal de la criticité géologique d'une matière « Z ».

Ainsi, nous avons mis en évidence une autre boucle de rétroaction stabilisatrice (en rose sur la Figure 3.16) et mis en relation d'autres facteurs (Marché VE, technologie de la batterie, volumes en fin de vie, demande d'une matière Z et ses réserves). Nous avons continué ce travail, en abordant le reste des facteurs identifiés. La fusion des différentes cartes cognitives permet la mise en évidence des boucles de rétroaction et des interactions moins évidentes.

Au final, nous avons abouti à un modèle global que nous illustrons à la Figure 3.17. Il s'agit d'une représentation simplifiée afin de le rendre lisible. Le développement détaillé de chacun des sept blocs du modèle est fait en annexe (B.4.2), par l'intermédiaire des diagrammes stock & flux. Pour ne pas encombrer le modèle, nous avons utilisé les symboles suivants :

- **xEV** pour les trois types de véhicules électrifiés: Electric Vehicle (EV), Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV) et Hybrid Electric Vehicle (HEV) ;
- **Process P** pour les deux procédés de recyclage : P1 & P2 (3.2.1.1.1.2);
- **yLIB** pour les technologies BLIs : nous allons préciser dans la section suivante, les technologies que nous considérons dans ce travail ;
- **Material Z** pour les matières qu'on retrouve dans les technologies BLIs retenues, elles seront précisées dans la section suivante

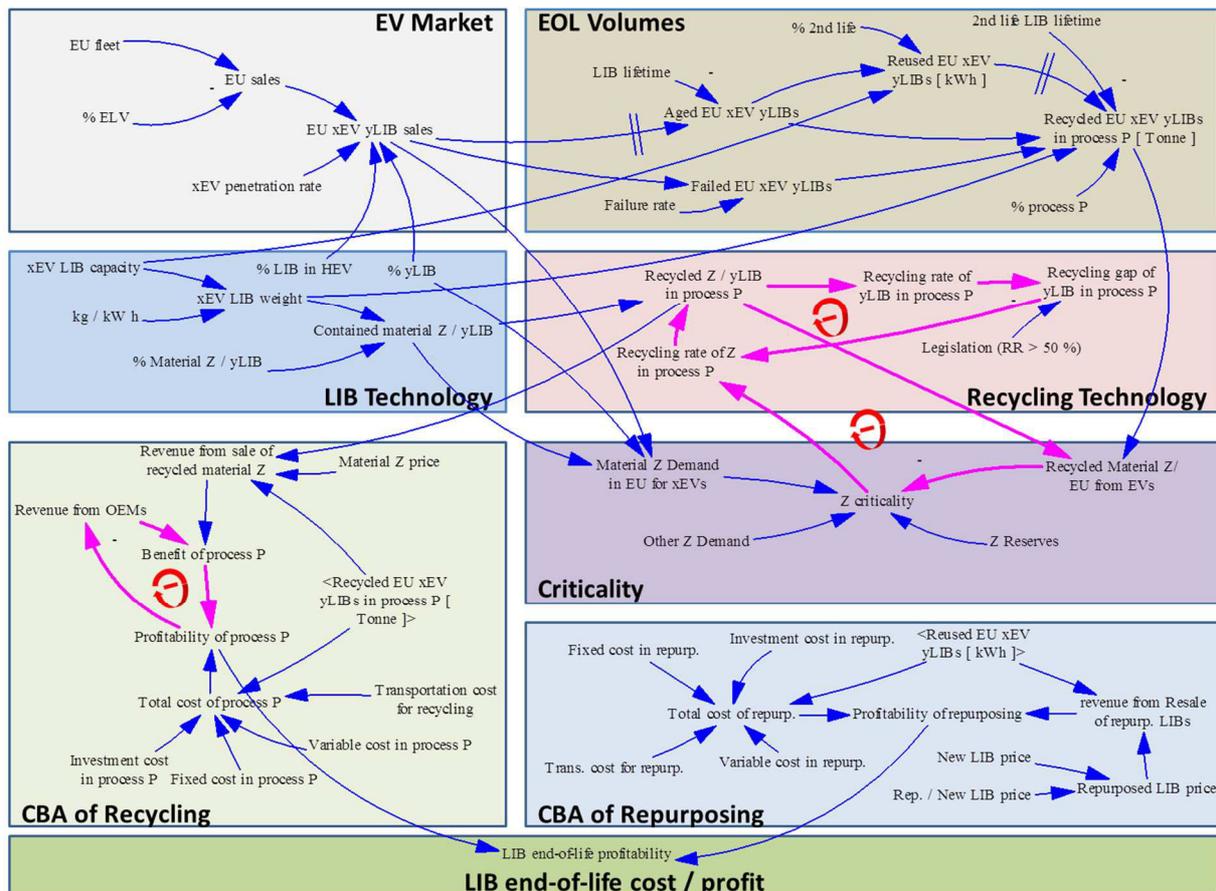


Figure 3.17. Vue globale du modèle DS.

A ce stade de la modélisation, nous avons identifié sept dynamiques d'évolution de la filière:

- **La formation des volumes en fin de vie** : fonction du marché VE, de la technologie de la BLI, sa capacité et sa durée de vie.
- **La répartition des volumes en fin de vie** : fonction de la dynamique « formation des volumes en fin de vie », du taux d'usage en 2nde vie et de la répartition entre les deux procédés P1 & P2.
- **La satisfaction du taux de recyclage réglementaire** : fonction de la dynamique « criticité géologique des matières », de la technologie de la BLI et du recyclage.
- **La criticité géologique des matières** : fonction des dynamiques « formation des volumes en fin de vie », « répartition des volumes en fin de vie », « satisfaction du taux de recyclage réglementaire », du marché VE, de la technologie de la BLI et des autres demandes de cette matière.
- **La rentabilité du recyclage** : fonction des dynamiques « formation des volumes en fin de vie », « répartition des volumes en fin de vie », des coûts et de ce qui fait les bénéfices (prix matières recyclées et revenu depuis les constructeurs).

- **La rentabilité du reconditionnement** : fonction des dynamiques « formation des volumes en fin de vie », « répartition des volumes en fin de vie », des coûts et de ce qui fait les bénéfices (prix BLI reconditionnée).
- **La rentabilité de la fin de vie de la batterie** : fonction des dynamiques « rentabilité du recyclage » et « rentabilité du reconditionnement ».

3.2.2.3 Formulation du modèle de simulation :

Dans cette section, nous appliquons l'étape 3 de la méthode DS afin de simuler le modèle. La simulation des dynamiques identifiées ci-dessus est faite grâce aux diagrammes stocks et flux¹⁶, en spécifiant les conditions initiales, les paramètres et les équations entre les variables. Un état de l'art important a été réalisé, comme le montrera l'annexe (B.4), afin de renseigner les grandeurs de ces variables et les équations qui les relient. L'application de cette étape est facilitée par l'utilisation du logiciel *Vensim*. Ce logiciel permet une construction aisée des modèles, avec des outils visuels et des boîtes de dialogues

Les variables du modèle DS peuvent être distinguées en deux types :

- Les variables exogènes : spécifiées par l'utilisateur au début de la simulation
- Les variables endogènes calculées par le modèle en fonction des équations qui les définissent.

L'annexe (B.4) répertorie et renseigne l'ensemble des variables du modèle, en définissant le type, la signification, les sources, les valeurs et équations que nous adoptons pour notre modèle. Ici, nous allons juste montrer les variables exogènes. Ces dernières représentent les variables candidates pour l'identification des variables clés à la construction des scénarios d'évolution de la filière.

Bloc du modèle	Variable	Signification	Unité	Incertitude ¹⁷
EV Market	EU Fleet	le nombre de véhicules particuliers en Europe par année	Veh. /an	+
	% ELV	la proportion des véhicules dans le parc qui arrivent en fin de vie par année.	%	-
	xEV penetration rate	le pourcentage des ventes VE, VHR et VHY dans les ventes globales par année en Europe.	%	+
EOL Volumes	LIB lifetime	la durée de vie calendaire automobile d'une BLI.	ans	+
	Failure rate	le % des véhicules défectueux dans le parc par an.	%	+

¹⁶ Voir annexe (B.3) pour le rappel des concepts de la DS

¹⁷ Voir annexe (B.4.1) pour la signification des signes et le remplissage de cette colonne.

	2nd life LIB lifetime	la durée de vie calendaire d'une BLI en usage 2 nd e vie.	ans	+
	% 2nd life	le pourcentage de BLIs en fin de vie automobile reconditionnées pour un usage en 2 nd e vie.	%	+
	% Process P	le pourcentage de BLIs en fin de vie automobile traitées dans le procédé P = 1 ou 2.	%	+
	% y LIB	le pourcentage de BLIs type « y » (voir section suivante)	%	+
LIB Technology	% LIB in HEV	la proportion des batteries HEV qui utilisent la technologie BLI.	%	+
	kg / kWh	le nombre de kilogrammes dans un pack (partie chimique et électrochimique) pour embarquer 1 kWh.	kg / kWh	-
	% Material Z / y LIB	la proportion d'une matière Z dans une BLI « y » (voir section suivante)	%	-
	xEV LIB capacity	la quantité d'énergie embarquée dans un VE, VHR et VHY.	kWh	+
Criticality	Other Z Demand	la demande en tonnes par année pour une matière Z, hors VE	Tonnes	+
	Z Reserves	la part des ressources connues et économiquement exploitables.	Tonnes	-
CBA of Recycling	Investment cost in process P	le coût initial pour l'installation d'une unité de recyclage	€ / Unité	+
	Fixed cost in process P	le coût annuel de fonctionnement d'une unité de recyclage (loyer, maintenance, salaires des managers, etc.)	€ / an	+
	Variable cost in process P	le coût de traitement d'une tonne de BLI (énergie, additifs chimiques, salaires des ouvriers, etc.)	€ / Tonne	+
	Trans. cost for recycling	le coût de transport d'une tonne de BLI vers les unités de recyclage	€ / Tonne	+
	Material Z price	le prix de revente d'une matière première Z recyclée	€ / Tonne	+
CBA of Repurposing	Investment cost in repurposing	le coût initial pour l'installation d'une unité de reconditionnement	€ / Unité	+
	Fixed cost in repurposing	le coût annuel de fonctionnement d'une unité de reconditionnement (loyer, salaires des managers, etc.)	€ / an	+
	Variable cost in repurposing	le coût de reconditionnement d'un kWh de BLI (énergie, salaires des ouvriers, etc.)	€ / kWh	+
	Trans. cost for repurposing	le coût de transport d'un kWh de BLI vers les unités de reconditionnement	€ / kWh	+
	Rep. / New LIB price	le rapport entre le prix d'une BLI reconditionnée et une BLI neuve	%	-
	New LIB price	le prix d'un kWh d'une BLI neuve	€ / kWh	+

Tableau 3.6. Ensemble des variables exogènes du modèle DS.

Concernant les sources et les valeurs que nous adoptons pour ces variables, elles sont renseignées en annexes (B.4.1). Vu l'importance accordée aux choix des technologies de notre filière (% y LIB), nous avons choisi de les expliciter ci-après.

Au chapitre 1, nous avons introduit quelques notions concernant les BLIs pour véhicules électrifiés. Nous rappelons qu'une BLI est composée de la partie électrochimique (cellules) et de la partie électrique et support (BMS, câbles de connexion et le circuit de refroidissement).

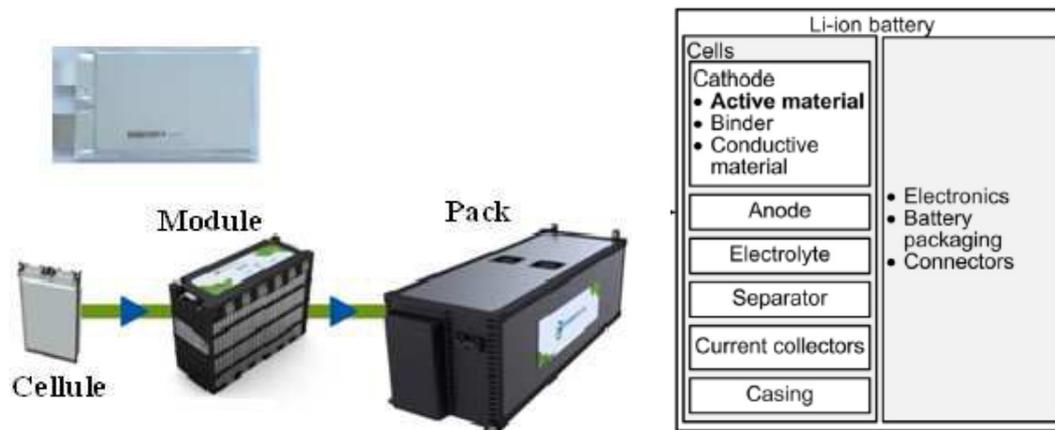


Figure 3.18. Décomposition et Composition d'une batterie. (Swart et al., 2014; Väyrynen and Salminen, 2012).

Plusieurs technologies de BLIs sont disponibles sur le marché. Ces technologies se distinguent principalement par la chimie de la cathode. C'est cette dernière qui définit le nom de la BLI. Dans la plupart des VEs commercialisés aujourd'hui, on retrouve principalement les quatre technologies : LMO (LiMn_2O_4), LFP (LiFePO_4), NMC ($\text{Li}(\text{Ni}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z)\text{O}_2$) et NCA ($\text{LiNi}_{0,8}\text{Co}_{0,15}\text{Al}_{0,05}\text{O}_2$). Ces technologies sont considérées comme celles de référence dans le futur (Avicenne Energy, 2013; Lamp, 2013; Möller, 2013).

Chacune de ces quatre technologies exhibe des bonnes performances sur certains critères et de mauvaises selon d'autres (annexes A.1). C'est ce qui explique la difficulté de l'émergence d'une technologie prépondérante. Cependant, nous pouvons distinguer deux catégories principales, du fait de leurs propriétés chimiques:

- Les batteries à base de nickel, manganèse et cobalt (LMO, LMO (avec LiNiO_2), NCA et NMC) : Les proportions de ces trois éléments définissent les propriétés exactes de ces batteries. Dans l'ensemble, elles sont plutôt chères, présentent une bonne durée de vie et d'autonomie avec des matériaux intéressants pour le recyclage.
- Les batteries LFP : Elles sont plutôt moins chères avec des matériaux moins intéressants pour le recyclage. Elles ont l'avantage d'être plus sûres et d'avoir une bonne durée de vie. Cependant, elles offrent moins d'autonomie.

En s'appuyant sur les technologies retenues dans d'autres travaux (ADEME, 2013c; Hoyer et al., 2014), nous considérons deux technologies représentatives : (i) une composition moyenne NMC ($\text{Li}(\text{Ni}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3})\text{O}_2$), comme technologie représentative de la première catégorie.

Des analyses de sensibilité vers un enrichissement en nickel ($\text{Li}(\text{Ni}_{0.8}\text{Mn}_{0.1}\text{Co}_{0.1})\text{O}_2$) ou en manganèse ($\text{Li}(\text{Ni}_{0.1}\text{Mn}_{0.8}\text{Co}_{0.1})\text{O}_2$) nous permettront de couvrir les autres technologies. (ii) la technologie **LFP (LiFePO₄)**, comme technologie représentative de la seconde catégorie.

Ainsi, nous retenons les technologies NMC et LFP. Les matières présentes dans ces deux dernières sont : Fe, Al, Cu, Li, Ni, Co, Mn, C, P et plastique.

3.2.2.4 Test du modèle et Sensibilité des variables incertaines

Le but de cette étape 4 de la méthode DS est la vérification et la validation du modèle. L'ensemble des tests pour la validation du modèle sont exposés en annexe (B.5.1). Dans cette section, nous montrons celui de l'analyse de sensibilité qui permet en plus de la validation, d'identifier les variables clés que nous utilisons par la suite.

Nous avons procédé à une analyse de sensibilité des variables incertaines (+). L'objectif est d'identifier celles qui ont le plus d'impact sur les dynamiques d'évolution de la filière. Ainsi, les variables clés sont les variables incertaines qui ont le plus d'effet sur ces dynamiques. Les variables clés serviront à la construction des scénarios d'évolution (chapitre 4), dans lesquels nous analyserons les dynamiques pertinentes d'un point de vue prospectif. **Il s'agit des dynamiques : « satisfaction du taux de recyclage réglementaire, « criticité géologique des matières », « rentabilité du recyclage », « rentabilité du reconditionnement » et « rentabilité de la fin de vie de la batterie ».**

Certaines de ces dynamiques (« satisfaction du taux de recyclage réglementaire », « rentabilité de la fin de vie de la batterie ») se retrouvant en entrée ou sortie d'autres dynamiques (3.2.2.2), **nous avons concentré l'analyse de sensibilité sur les trois dynamiques : « criticité géologique des matières », « rentabilité du recyclage » et « rentabilité du reconditionnement »**

Dans le modèle DS, **les variables endogènes** capturant cette sensibilité des variables exogènes incertaines sont :

- **« Z Crit »** ($Z = \text{Fe, Al, Cu, Li, Ni, Co, Mn, C, P}$) : cette variable traduit une échelle de criticité entre 0 et 10 à un instant 't', 10 signifiant que 100% des réserves de la matière 'Z' sont consommées (B.4.2.4).
- **« Cumul CBA of P »** ($P = P1, P2$): cette variable traduit le cumul de la différence entre les coûts et les bénéfices de toutes les unités d'un procédé 'P' à un instant 't'.

Les coûts comportent les investissements, les coûts fixes, les coûts variables et les coûts de transport. Les bénéfices comportent juste la revente des matières recyclées, **les revenus depuis les constructeurs ne sont pas inclus dans cette variable** (B.4.2.6).

- « **Cumul CBA of Repurposing** » : cette variable traduit le cumul de la différence entre les coûts et les bénéfices de toutes les unités du reconditionnement à un instant 't'. Les coûts comportent les investissements, les coûts fixes, les coûts variables et les coûts de transport. Les bénéfices comportent la revente des batteries reconditionnées (B.4.2.7).

Nous obtenons 12 variables endogènes au total. Ainsi, 252 analyses de sensibilités seraient nécessaires (21 variables exogènes incertaines * 12 variables endogènes). Dans un souci de simplification des calculs et d'illustration des résultats, nous retenons les variables : « **Co Crit** », « **Cumul CBA of P1** » et « **Cumul CBA of Repurposing** ». Le cobalt est choisi puisqu'il s'agit de la matière la plus susceptible d'être influencée par l'électromobilité, comme le montrera le chapitre 4 (4.2).

L'analyse de sensibilité consiste à faire varier d'une manière aléatoire une variable donnée dans son intervalle d'incertitude et de constater la propagation de cette variation, via la méthode Monte Carlo qui est disponible sur le logiciel *Vensim*.

Le Tableau 3.7 récapitule le résultat de l'analyse de sensibilité des variables incertaines, les graphiques sont disponibles en annexe (B.5.2). Pour la compréhension du tableau et des graphiques de sensibilités, nous illustrons l'exemple de la variable exogène « %NMC » et son effet sur la variable endogène « Cumul CBA of P1 » (rentabilité du recyclage).

Une variation de $\pm 50\%$ de « %NMC » par rapport à sa valeur de référence (**50%**) implique une valeur de la variable allant de $0,25\%$ (**50%** - (**50%*****50%**)) à $0,75\%$ (**50%** + (**50%*****50%**)).

Pour la valeur de référence (**50%**), « Cumul CBA of P1 » (courbe en bleu sur la Figure 3.19) en 2050 est à -5 872 M€, nous rappelons que cette variable traduit le cumul de la différence coûts-bénéfices de toutes les unités de P1 depuis 2010, sans le revenu de recyclage depuis les constructeurs (B.4.2.6).

Lorsque cette variable varie entre $0,25\%$ et $0,75\%$, l'écart inférieur (-4 739 M€) et supérieur (-6 996 M€) par rapport à la référence (courbes en vert sur la Figure 3.19) représentent -19,3% et 19,1% respectivement. Ainsi, nous obtenons un écart total de 38,4%.

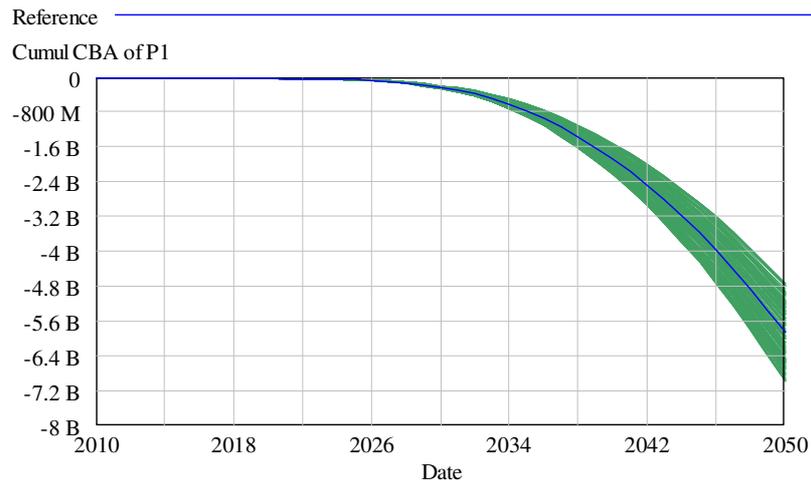


Figure 3.19. Sensibilité de la variable endogène « Cumul CBA of P1 » par rapport à la variable exogène « %NMC ».

Bloc du modèle	Variable	Valeur référence	Intervalle variation	Cumul CBA of P1	Cumul CBA of repurposing	Co Crit
EV Market	EU Fleet	ETP_4DS	[-12% ; 0]	11,6%	11,7%	0,7%
	xEV penetration rate	(ETP_2DS + 4DS) / 2	+ - 50%	97,9%	95,5%	5,5%
EOL Volumes	LIB lifetime	10 ans	[0; +50%]	36,7%	37,1%	1,2%
	Failure rate	0,25%	+ - 50%	4,1%		0,1%
	2nd life LIB lifetime	5 ans	[0; +50%]	6,0%		0,2%
	% 2nd life	50%	+ - 50%	19,1%	95,5%	0,6%
	% P1	50%	+ - 50%	97,9%		0,1%
	% NMC	50%	+ - 50%	38,4%		5,5%
LIB Technology	% LIB in HEV	50% (2020), 100% (2025)	[0; -30%]	3,1%		0,1%
	xEV LIB capacity	VE = 24 kWh PHEV = 10 kWh	[0; +25%]	23,1%	39,1%	1,3%
Criticality	Other Co Demand	90 000 tonnes	[0; +5%]			61,3%
CBA of Recycling	Investment cost in process P1	Voir Tableau B.24	[0; +20%]	1,2%		
	Fixed cost in process P1	Voir Tableau B.24	[0; +20%]	3,6%		
	Variable cost in process P1	Voir Tableau B.24	+ - 20%	18,6%		
	Trans. cost for recycling	1 250 € / tonne	+ - 20%	37,4%		
	Co price	18 743 € / tonne	[0; +3%]	37,7%		
CBA of Repurposing	Investment cost in repurposing	851 681 € / unité	[0; +20%]		2,7%	

	Fixed cost in repurposing	903 058 € / an	[0; +20%]		56,9%	
	Variable cost in repurposing	17 €/ kWh	[0; +20%]		134,5%	
	Trans. cost for repurposing	16 €/ kWh	+ - 20%		253,0%	
	New LIB price	175 €/ kWh (2020) 152 €/ kWh (2025)	+ - 20%		303,2%	

Tableau 3.7. Récapitulatif de l'analyse de sensibilité.

Les cases en gris signifient que les variables sont indépendantes. Les variables les plus influentes ont été mises en vert, il s'agit des variables clés. Nous les avons synthétisées dans le tableau suivant, en les hiérarchisant.

	Rentabilité recyclage	Rentabilité Reconditionnement	Criticité géologique des matières
Effet sur 3 dynamiques	xEV penetration rate	xEV penetration rate	xEV penetration rate
	LIB lifetime	LIB lifetime	LIB lifetime
	xEV LIB capacity	xEV LIB capacity	xEV LIB capacity
Effet sur 2 dynamiques	% 2nd life	% 2nd life	
	Trans. Cost	Trans. Cost	
	% NMC		% NMC
Effet sur 1 dynamique	% P1		
	Co price		
	Variable cost in P1		
		New LIB price	
		Variable cost in rep.	
		Fixed cost in rep.	
			Other Co Demand
Très grand effet	Grand effet	Effet moyen	Effet négligeable

Tableau 3.8. Classement de l'effet des variables clés.

Nous remarquons que les variables qui ont le plus d'influence par ordre décroissant sur les dynamiques sont:

- Rentabilité du recyclage : Marché VE, % P1, % NMC, prix du Co, coût de transport, durée de vie BLI, Capacité BLI, % 2^{nde} vie et coût variable de recyclage.
- Rentabilité du reconditionnement : Prix BLI neuve, coût de transport, coût variable de reconditionnement, Marché VE, % 2^{nde} vie, coût fixe de reconditionnement, capacité BLI et durée de vie BLI.
- Criticité géologique des matières: Autre demandes, marché VE, % NMC, durée de vie BLI, Capacité BLI.

3.2.2.5 Conclusions sur l'application de la cartographie cognitive et de la DS

La DS, facilitée par la cartographie cognitive, nous a permis de comprendre les dynamiques d'évolution de la filière et d'identifier les variables clés. Un état de l'art conséquent et des rencontres avec des experts nous ont permis de renseigner et de valider ce modèle.

Nous avons identifié les sept dynamiques suivantes : « **La formation des volumes en fin de vie** », « **La répartition des volumes en fin de vie** », « **La satisfaction du taux de recyclage réglementaire** », « **La criticité géologique des matières** », « **La rentabilité du recyclage** », « **La rentabilité du reconditionnement** » et « **La rentabilité de la fin de vie de la batterie** ».

Enfin, nous avons identifié la liste des variables clés suivantes : « **xEV penetration rate** », « **LIB lifetime** », « **xEV LIB capacity** », « **% 2nd life** », « **Trans. Cost** », « **%NMC** », « **% P1** », « **Material Z price** », « **Variable cost in process P** », « **New LIB price** », « **Variable cost in repurposing** », « **Fixed cost in repurposing** », « **Other Z Demand** ». La figure suivante récapitule l'effet de ces variables clés sur ces dynamiques.

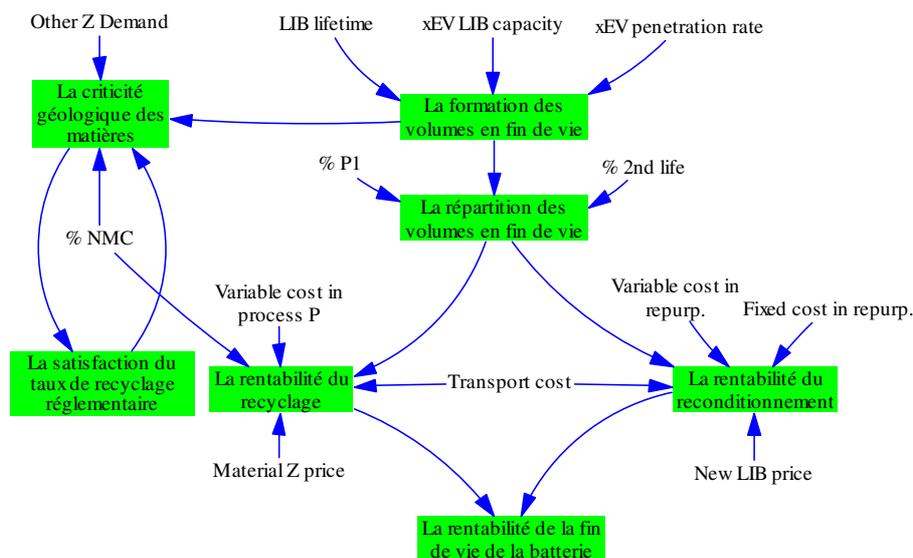


Figure 3.20. Effets des variables clés sur les dynamiques d'évolution.

Cette liste de variables clés nous sert de transition, entre ce présent chapitre/question de recherche sur la modélisation et le chapitre/question de recherche suivant sur la prospective.

3.3 Conclusions du chapitre 3

Dans ce troisième chapitre, nous avons appliqué ; d'une manière combinée, trois méthodes de modélisation (SCOS'M, la cartographie cognitive et la dynamique des systèmes) pour répondre à la première question de recherche. Cela nous a permis :

- **La caractérisation de la filière (parties prenantes, sous-systèmes, etc.)**
- **La compréhension des dynamiques d'évolution de la filière et l'identification des variables clés.**

Nous rappelons que cette première question de recherche est la **fondation** sur laquelle s'appuieront les deux questions de recherche restantes. La figure suivante illustre, à l'aide de la cartographie cognitive, l'articulation de ces trois questions de recherche afin de répondre à la problématique.

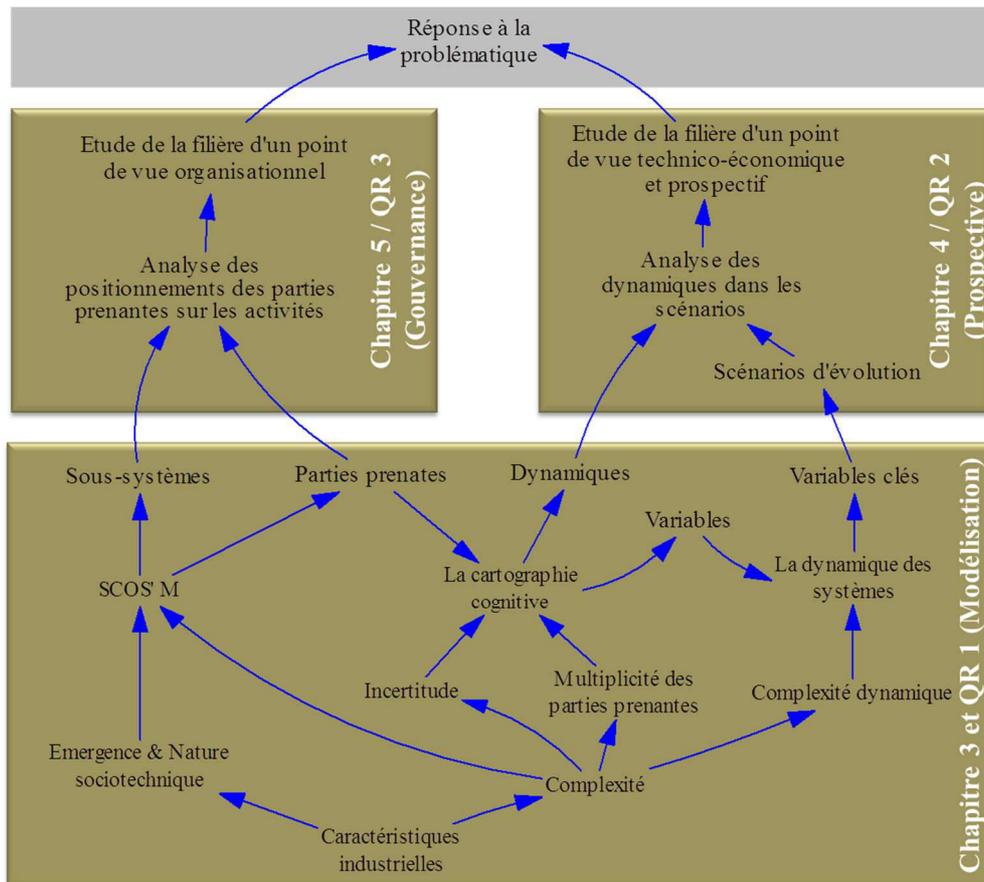


Figure 3.21. Illustration de notre travail par une carte cognitive (**questions de recherche**, problématique).

La 2nde question de recherche : « **Comment faire de la prospective sur la Filière de valorisation des BLIs ?** » exploite les **variables clés** que nous venons de lister ci-dessus afin d'élaborer des scénarios et d'analyser les **dynamiques d'évolution** de la filière dans ces derniers. C'est l'objet du chapitre suivant.

La 3^{ème} question de recherche : « **Comment analyser la gouvernance de la Filière de valorisation des BLIs ?** » exploite la liste des **parties prenantes** et des **sous-systèmes** de la filière, représentant les activités, pour analyser les positionnements de ces parties prenantes sur ces activités. C'est l'objet du cinquième chapitre.

Chapitre 4 : Prospective sur l'évolution de la filière

Dans le chapitre précédent, nous avons ancré les éléments de fondation pour étudier la filière de valorisation des BLIs d'un point de vue technico-économique, organisationnel et prospectif. Dans ce présent chapitre, nous nous intéressons aux aspects technico-économiques et prospectifs, en répondant à la deuxième question de recherche : « **Comment faire de la prospective sur la filière de valorisation des BLIs ?** ».

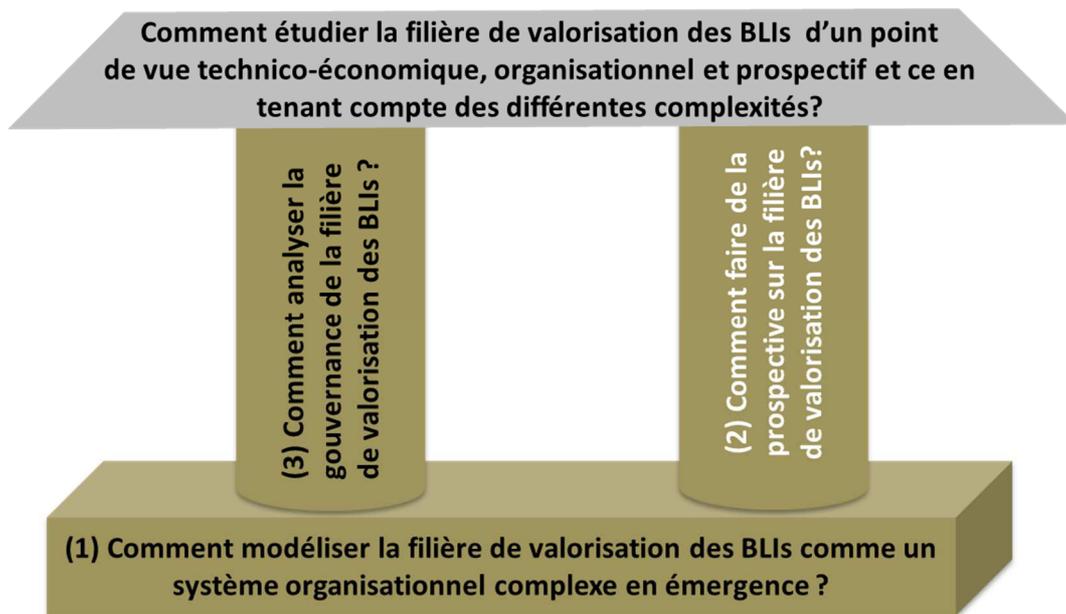


Figure 4.1. **Articulation des trois questions de recherche** pour répondre à la problématique.

Au premier chapitre, nous avons identifié les quatre motivations pour la valorisation des BLIs, que nous avons qualifiées de raisons d'être ou de finalités de la filière de valorisation. Il s'agit des motivations **géostratégiques, réglementaires, économiques et environnementales**. A l'exception de la motivation environnementale (3.2.2.1), les trois autres motivations sont prises en compte dans notre modèle DS à travers les dynamiques : **criticité géologique des matières, satisfaction du taux de recyclage réglementaire, rentabilité du recyclage, du reconditionnement et de la fin de vie**.

Ainsi, faire de la prospective sur la filière suppose d'apporter des éléments de réponse à ces trois motivations, à travers l'analyse des dynamiques d'évolution ci-dessus dans différents « scénarios » (la notion de scénario fait l'objet de la section suivante), tout en considérant plusieurs technologies de batteries, plusieurs options de valorisation et plusieurs procédés de recyclage. Pour ce faire, nous appliquons l'étape 5 de la DS

(construction des scénarios et évaluation des stratégies), en exploitant les **variables clés** afin d'élaborer des scénarios (4.1) et d'analyser les **dynamiques** en découlant.

Afin de présenter les résultats d'une manière qui tient compte des aspects technico-économiques et prospectifs (comparaison des différentes technologies et réponses aux motivations de valorisation ci-dessus), nous avons regroupé les analyses de la manière suivante :

- **Analyse de la criticité géologique des matières**, avec la dynamique : criticité géologique des matières.
- **Analyse des procédés de recyclage**, avec les dynamiques : satisfaction du taux de recyclage réglementaire et rentabilité du recyclage.
- **Analyse du reconditionnement**, avec la dynamique : rentabilité du reconditionnement.
- **Analyse du coût de la fin de vie**, avec la dynamique : rentabilité de la fin de vie de la batterie.

Dans la première section de ce chapitre, nous allons présenter un état de l'art succinct sur la planification par scénario afin de choisir la bonne méthode. Puis, nous allons construire et présenter les scénarios retenus. Le reste du chapitre sera consacré à la présentation des résultats principaux des quatre analyses ci-dessus.

4.1 Construction des scénarios

Les **scénarios** sont des récits d'environnements alternatifs dans lesquels les décisions d'aujourd'hui peuvent être testées. Ce ne sont ni des prédictions, ni des stratégies (Ogilvy and Schwartz, 2004). La planification par scénarios fait référence au fait qu'un scénario construit est utilisé comme outil d'aide à la décision pour développer des projets, créer des stratégies fiables, éviter l'incertitude et la complexité (Amer et al., 2013).

Dans (Acosta and Idjis, 2014), nous avons comparé et classifié plusieurs méthodes de scénarisation (la méthode Shell, la méthode SCRAM, etc.) en fonction de plusieurs paramètres (forte incertitude, complexité, explorer plusieurs scénarios, travailler avec les systèmes émergents, etc.). Cette comparaison nous permet de conclure que **la matrice SRI (Stanford Research Institute) apparaît comme la plus pertinente pour notre travail et système étudié.**

La matrice SRI est un outil simple développé à la fin des années 70s. Elle considère trois à quatre scénarios (“*expected future*”, “*worst case*”, “*best case*”, et “*highly different alternative*”) (Bishop et al., 2007). Elle peut être utilisée sous cette forme classique (Cluzel, 2012), ou en croisant deux dimensions (Farel et al., 2013). **Cette seconde variante permet d'affiner et de considérer plus de scénarios (plus de croisement entre les variables). C'est cette dernière que nous adoptons ici.** La figure suivante en illustre la forme.

			Dimension 2		
			Best case	Expected	Worst case
			?	?	?
Dimension 1	Best case	?	S1	S2	S3
	Expected	?	S4	S5	S6
	Worst case	?	S7	S8	S9

Tableau 4.1. Forme générale d'une matrice SRI 'croisée'.

Ainsi, nous allons utiliser la matrice SRI 'croisée' pour construire des scénarios à la base des variables clés identifiées au chapitre précédent. Nous rappelons ces variables dans le tableau suivant.

Dynamiques			
	Rentabilité recyclage	Rentabilité Reconditionnement	Criticité géologique des matières
Effet sur 3 dynamiques	xEV penetration rate	xEV penetration rate	xEV penetration rate
	LIB lifetime	LIB lifetime	LIB lifetime
	xEV LIB capacity	xEV LIB capacity	xEV LIB capacity
Effet sur 2 dynamiques	% 2nd life	% 2nd life	
	Trans. Cost	Trans. Cost	
	% NMC		% NMC
Effet sur 1 dynamique	% P1		
	Material Z price		
	Variable cost in P		
		New LIB price	
		Variable cost in rep.	
		Fixed cost in rep.	
			Other Z Demand
Très grand effet	Grand effet	Effet moyen	Effet négligeable

Tableau 4.2. Classement de l'effet des variables clés.

Nous rappelons que nous avons testé la sensibilité de ces variables sur seulement trois dynamiques, dans un souci de simplification (3.2.2.4). Cependant, ces variables interviennent dans l'ensemble des dynamiques d'évolution, comme le montre la figure suivante (en vert).

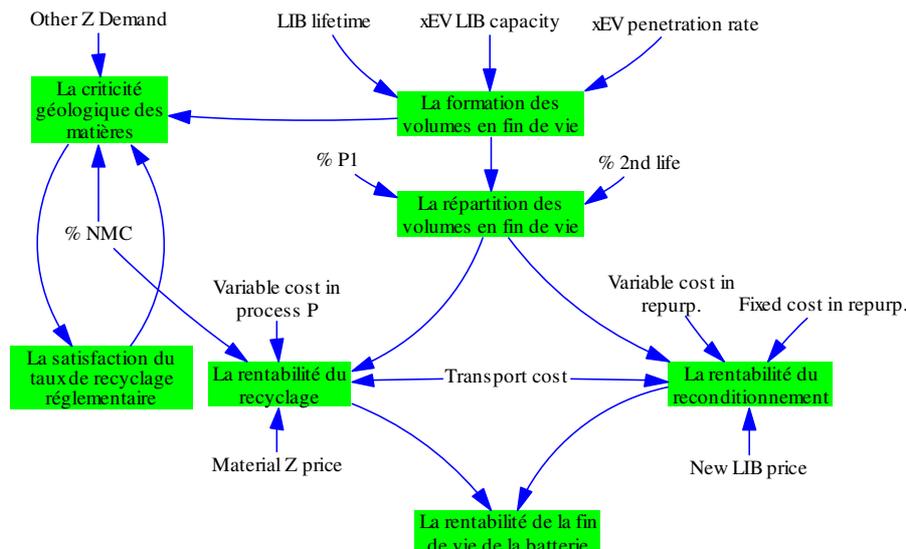


Figure 4.2. Effets des variables clés sur les dynamiques d'évolution.

Afin de pouvoir utiliser la matrice SRI croisée, **nous allons devoir choisir deux dynamiques représentant les deux dimensions de la matrice**. A l'inverse de l'analyse de sensibilité, où nous avons pris les **dynamiques intermédiaires** (rentabilité du recyclage / reconditionnement et criticité géologique des matières), nous choisissons les deux **dynamiques extrêmes** (entrée et sortie du modèle). **Par conséquent, les deux dimensions de la matrice SRI sont : « La formation des volumes en fin de vie » et « La rentabilité de la fin de vie de la batterie ».**

Les variables qui interviennent dans la première dimension sont : « **xEV penetration rate** » (marché des véhicules électrifiés), « **LIB lifetime** » (durée de vie de la BLI) et « **xEV LIB capacity** » (capacités des BLIs). Les variables qui interviennent dans la seconde dimension sont toutes les variables clés identifiées (y compris les trois précédentes de la 1^{ère} dimension), à l'exception de la variable « Other Z Demand ». Pour cette seconde dimension, nous retenons les variables qui étaient intervenues sur au moins deux dynamiques intermédiaires (Tableau 4.2), **il s'agit des variables « % 2nd life »** (proportion de la réutilisation en 2^{nde} vie), « **Transport cost** » (coût de transport) et « **% NMC** » (proportion des BLIs de la technologie NMC). Cela nous permettra d'entamer les différentes analyses de ce chapitre dans des scénarios représentatifs.

Pour les variables que nous n'avons pas prises en compte dans les scénarios (Variable cost in process P, Material Z price, Variable cost in repurp., Fixed cost in repurp., New LIB price, Other Z Demand), elles feront l'objet d'analyses de sensibilités afin de les prendre en compte dans leur unique dynamique correspondante.

Concernant la variable « % P1 », nous ne disposons pas d'éléments pour délimiter sa valeur, ou même la calculer par un modèle logit binaire. **Nous la fixons à 50% dans tous les scénarios.** Cela nous permettra de comparer les deux procédés de recyclage dans des conditions identiques.

Au final, la matrice SRI a la forme initiale suivante :

					Rentabilité de la fin de vie			
		Best case	Expected	Worst case	Best case	Expected	Worst case	
Formation des Volumes	Best case	?	?	?	S1	S2	S3	% 2nd life
	Expected	?	?	?	S4	S5	S6	% NMC
	Worst case	?	?	?	S7	S8	S9	Trans. Cost
		LIB lifetime	xEV LIB capacity	xEV penetration rate				

Tableau 4.3. Matrice SRI initiale des scénarios.

L'étape suivante est la construction des scénarios à travers le remplissage de la matrice ci-dessus. C'est l'objet des sections suivantes.

4.1.1 Remplissage de la matrice SRI

4.1.1.1 xEV penetration rate (Marché des VEs)

Cette variable traduit le pourcentage des ventes VE (100% électrique), VHR (hybride rechargeable) et VHY (hybride simple) dans les ventes globales par année en Europe. Elle a un **effet positif** sur la dynamique de formation des volumes. Lors de la collecte de données pour l'analyse de sensibilité (B.4.1.1.3), nous avons identifié et retenu les scénarios de ventes de VEs suivants:

- Deux scénarios (2DS et 4DS) issus de (IEA, 2015, 2012a), que nous appelons : *ETP_2DS* et *ETP_4DS* respectivement.
- Trois scénarios (Moderately decarbonised, Slightly decarbonised, Highly decarbonised) issus de (Pasaoglu et al., 2012), que nous appelons : *EU_Sligh*, *EU_Mod.* et *EU_High.* respectivement.
- Un scénario français issu de (ADEME, 2012) que nous incluons puisque c'est un marché important et représentatif de l'Europe. Nous l'appelons : *Ademe FR.*

Nous avons conclu que les scénarios ETP délimitent le spectre des possibilités et peuvent représenter les situations extrêmes. Ainsi, nous considérons la courbe ETP_2DS comme *Best case* (BC), la courbe ETP_4DS comme *Worst case* (WC) et la moyenne entre les deux comme *Expected* (Ex). La figure suivante illustre ces courbes pour les ventes VE et VHR.

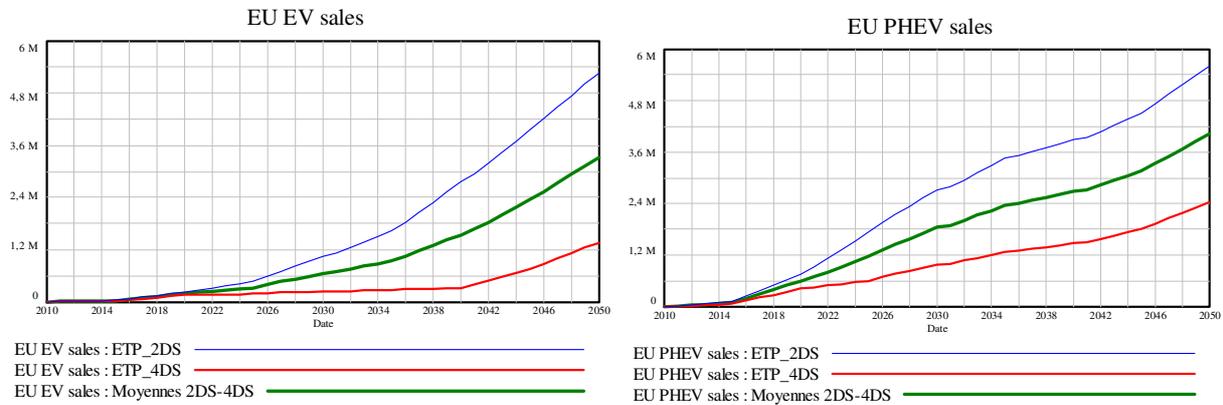


Figure 4.3. Valeurs de la variable « xEV penetration rate » à travers les différents scénarios.

4.1.1.2 xEV LIB capacity (capacités des BLIs)

Cette variable traduit la quantité d'énergie embarquée dans un VE, VHR et VHY, elle est responsable de l'autonomie de ces derniers. Elle a un **effet positif** sur la dynamique de formation des volumes. Considérant la marge des possibilités identifiées au Tableau B.7 (B.4.1.3.3), nous adoptons les valeurs suivantes :

	VE	VHR	VHY
Best case	30 kWh	12,5 kWh	2 kWh
Expected	24 kWh	10 kWh	
Worst case	10 kWh	10 kWh	

Tableau 4.4. Valeurs de la variable « xEV LIB capacity » à travers les différents scénarios.

Nous n'avons pas souhaité créer une situation fictive extrêmement défavorable, et c'est pour cette raison que les lignes 'Expected' et 'worst case' sont identiques. La capacité d'un VHY présente moins de variabilité et d'effet sur la dynamique, **nous la fixons dans toutes les situations.**

4.1.1.3 LIB lifetime (durée de vie de la BLI)

Cette variable traduit la durée de vie calendaire automobile d'une BLI. Elle a un **effet négatif** sur la dynamique de formation des volumes. Plus elle est grande et moins les volumes en fin de vie à un instant 't' seront importants, en retardant et translatant la courbe des volumes en fin de vie. Autrement dit, elle ne fait que situer dans le temps les conclusions de nos analyses. A titre d'exemple, si nous concluons que le coût du recyclage se stabilisera en 2025 avec une

durée de vie BLI à 10 ans, il le sera en 2030 avec une durée de vie à 15 ans. **Par conséquent, nous la fixons à une valeur moyenne dans tous les scénarios.** Ainsi, nous considérons une durée de vie initiale de 10 ans (ADEME, 2013c; Amarakoon et al., 2013; Wang et al., 2014b), elle sera progressivement améliorée jusqu'à atteindre 15 ans en 2020 (Neubauer et al., 2014; USABC, 2015), comme le montre la figure suivante.

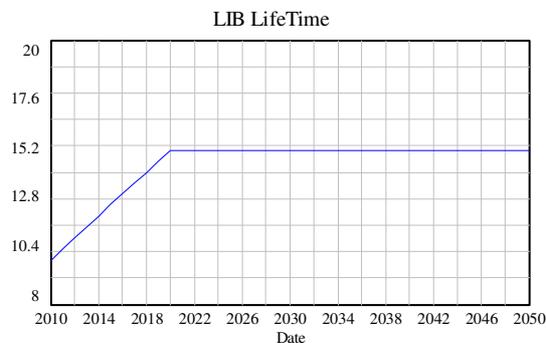


Figure 4.4. Valeur de la variable « LIB lifetime » à travers les différents scénarios.

4.1.1.4 % 2nd life (proportion de la réutilisation en 2nde vie)

Cette variable traduit le pourcentage de BLIs en fin de vie automobile reconditionnées pour un usage en 2nde vie. Elle a un effet **positif** sur la rentabilité du reconditionnement et un effet **négatif** sur la rentabilité du recyclage. Toutefois, nous verrons que cet effet sur le recyclage diminue progressivement avec l'arrivée de plus de volumes, il s'estompe complètement à l'horizon 2030 (4.3.3). Concernant la dynamique « la rentabilité de la fin de vie de la batterie », nous allons démontrer son effet positif sur cette dernière. Cette démonstration est exposée au paragraphe suivant.

Soit V_0 un volume en fin de vie, V_{recon} la part reconditionnée ($V_{recon} = V_0 * \%2^{nd} life$) et V_{recyc} la part recyclée ($V_{recyc} = V_0 * (1 - \%2^{nd} life)$). Pour démontrer que le reconditionnement a un impact positif sur la rentabilité de la fin de vie, il faudra que l'augmentation du coût de recyclage ($\Delta_{coût}$), due à la perte du volume reconditionné, soit plus petite que le gain apporté par le reconditionnement (*marge*).

Par conséquent : $V_0 * (1 - \%2^{nd} life) * \Delta_{coût} \leq V_0 * \%2^{nd} life * marge$.

Cela implique : $\Delta_{coût} \leq \frac{\%2^{nd} life}{1 - \%2^{nd} life} * marge$

Contrairement au recyclage, le reconditionnement n'est pas une activité obligatoire, une valeur de la variable « %2nd life » supérieure à zéro signifie que cette activité est nécessairement rentable. Nous avons estimé la marge minimale pour assurer une rentabilité en 5 ans et un TRI de 25-30%, à **10 €/kWh**. C'est l'équivalent de **800€ /t**. En considérant cette

marge (800€/t), le tableau suivant calcule le $\Delta_{\text{coût}}$ permissible (garantissant un effet positif du reconditionnement) en fonction du %2nd vie.

%2nd life	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%
$\frac{\%2nd\ life}{1 - \%2nd\ life} * 800$	89 €	200 €	343 €	533 €	800 €	1 200 €	1 867 €	3 200 €

Tableau 4.5. Augmentation admissible du coût de recyclage ($\Delta_{\text{coût}}$).

Le gain apporté par le reconditionnement est plus grand et compense l'augmentation du coût de recyclage, due à la perte du volume basculé du recyclage vers le reconditionnement, et ça quelle que soit la valeur de la variable « %2nd life ». Nous adoptons les valeurs suivantes : **80%** (Best case) et **0%** (Worst case) qui de notre point de vue constituent les deux extrêmes, une valeur intermédiaire estimée à **20%** (Expected case) qui reflète la présence de fortes contraintes de faisabilité.

4.1.1.5 % NMC (proportion des BLIs NMC)

Cette variable traduit la proportion des batteries NMC ($\text{LiNi}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{O}_2$), indirectement celles des LFP (LiFePO_4) : $1 - \% \text{ NMC}$. Elle a un effet **positif** sur la rentabilité du recyclage et celle de la fin de vie de la batterie. En s'appuyant sur (Hoyer et al., 2014), nous adoptons les valeurs suivantes :

	Acronyme	% NMC
Best case	NMC.2	80% sur toute la période considérée.
Expected	NMC.1	Diminution à partir de 80% en 2015 pour se stabiliser à 50% en 2030.
Worst case	NMC.3	Diminution à partir de 80% en 2015 pour se stabiliser à 20% en 2030.

Tableau 4.6. Valeurs de la variable « % NMC » à travers les différents scénarios.

4.1.1.6 Transport cost (coût de transport)

Cette variable traduit le coût de transport d'une tonne de BLI vers les unités de recyclage ou d'un kWh de BLI vers les unités de reconditionnement. Au chapitre précédent, nous l'avons estimé entre 1000 €/t et 1500 €/t (B.4.1.6.2). En considérant une valeur moyenne de la variable « kg/kWh » = 12,5 (B.4.1.3.4), nous adoptons les valeurs suivantes :

	Acronyme	Transport cost
Best case	TC.2	Diminution à partir de 1500 €/t (18,7 €/kWh) en 2020 pour se stabiliser à 1000 €/t (12,5 €/kWh) en 2030.
Expected	TC.1	Diminution à partir de 1500 €/t (18,7 €/kWh) en 2020 pour se stabiliser à 1250 €/t (15,6 €/kWh) en 2030.
Worst case	TC.3	1500 €/t (18,7 €/kWh) sur toute la période

Tableau 4.7. Valeurs de la variable « Transport cost » à travers les différents scénarios.

Au vu de l'incertitude liée à ces coûts de transport, ils sont intégrés à la fin de nos analyses comme coût additionnel. A titre d'exemple, nous calculerons le coût de recyclage et déduisons le coût de recyclage global (coût de recyclage + coût de transport).

4.1.2 Présentation des scénarios

En reportant les valeurs des variables ci-dessus, nous avons constaté que la ligne 'cas le plus défavorable' (Worst case = WC) de la première dimension de la matrice SRI, présente moins de différence et d'intérêt par rapport à la ligne 'Attendu' (Expected = Ex) (Tableau 4.8). Des simulations à posteriori ont aussi confirmé ce constat.

Formation des Volumes	BC	12,5 - 30	ETP_2DS
	Ex	10 - 24	Moyenne
	WC	10 - 24	ETP_4DS
		xEV LIB capacity VHR - VE (kWh)	xEV penetration rate

Tableau 4.8. Première dimension de la Matrice SRI.

Aussi, nous l'avons éliminée et nous obtenons au final 6 scénarios récapitulés ci-après.

				Rentabilité de la fin de vie			
				BC	Ex	WC	
				80%	20%	0%	% 2nd life
				NMC.2	NMC.1	NMC.3	% NMC
				TC.2	TC.1	TC.3	Trans. Cost
Volumés	BC	12,5 - 30	ETP_2DS	S1	S2	S3	
	Ex	10 - 24	Moyenne	S4	S5	S6	
			xEV LIB capacity VHR - VE (kWh)				

Tableau 4.9. Matrice SRI finale des scénarios.

Pour la suite, nous rappellerons ces six scénarios par le graphique suivant.

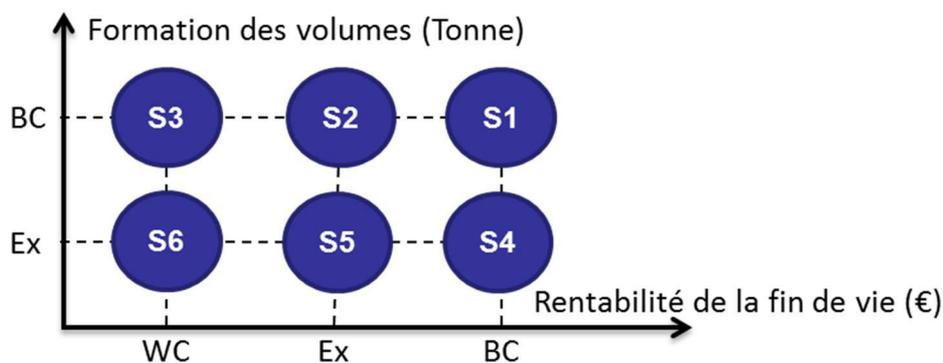


Figure 4.5. Représentation simplifiée des six scénarios. (BC=Best case, Ex = Expected, WC = Worst case)

Maintenant que nous avons défini les scénarios d'évolution de la filière, nous allons entamer les analyses prospectives, à commencer par la criticité géologique des matières.

4.2 Analyse de la criticité géologique des matières

La criticité est généralement définie comme : « une caractéristique dynamique et multidimensionnelle d'une matière, qui décrit le niveau de vulnérabilité inhérente ainsi que le risque au sein de sa chaîne d'approvisionnement » (Bustamante et al., 2014).

Comme la définition l'indique, la criticité est multidimensionnelle. Elle est l'agrégation de plusieurs facteurs. Achzet and Helbig (2013) ont analysé 15 études sur la criticité entre 2006 et 2011, ils ont recensé 20 facteurs de risque. Parmi ces derniers, 9 facteurs ont été utilisés dans au moins trois études. Ils sont par ordre décroissant d'utilisation: la concentration géographique, la situation politique des états, **la consommation des réserves**, la dépendance avec d'autres minerais, la concentration des sociétés minières, **l'augmentation de la demande**, **la recyclabilité**, la substituabilité et la dépendance des importations.

Dans ce travail, notre modèle n'intègre que les facteurs liés à la disponibilité physique des matières, à savoir « la consommation des réserves », en prenant en compte « l'augmentation de la demande » et « le recyclage ». Par conséquent, nous analysons ce que nous appelons : **la criticité géologique des matières**. Il s'agit d'une première étape qui répond partiellement à la question de la criticité et qui devra être complétée ultérieurement par une étude globale.

Dans une BLI¹⁸, il y a des métaux (Li, Ni, Mn, Co, Cu, Al et Fe) et des non-métaux (C et P). Nous rappelons leurs réserves et productions en 2010 au tableau suivant (B.4.1.5).

	Li	Ni	Mn	Co	Cu	Al	C	Fe	P
Réserves (millions t)	13,5	81	570	7,3	700	28 000	110	87 000	67 000
Prod_2010 (millions t)	0,028	1,59	13,9	0,09	15,9	40,8	0,925	1140	181

Tableau 4.10. Réserves et productions des matières d'une BLI (USGS, 2015, 2014, 2013, 2012, 2011, 2010).

Tout d'abord, nous avons procédé à une analyse préliminaire concernant la criticité géologique avant le développement de l'électromobilité. Nous avons calculé le nombre d'années restantes pour l'exploitation de chaque matière à son niveau de 2010.

	Li	Ni	Mn	Co	Cu	Al	C	Fe	P
Nb d'années (Prod_2010)	482	51	41	81	44	686	119	76	370

Tableau 4.11. Nombre d'années restantes pour la consommation des réserves.

On remarque qu'il y a des matières pour lesquelles il reste moins d'une centaine d'années d'exploitation. C'est le cas du Ni, Mn, Co, Cu et Fe. Ces dernières présentent une criticité

¹⁸ Nous rappelons que le terme BLI fait référence à une batterie lithium-ion d'un véhicule électrifié.

géologique potentielle avant le développement de l'électromobilité. Pour savoir si cette criticité géologique sera effective et éventuellement induite par l'électromobilité, il faut intégrer à l'aide du modèle DS, la future demande pour les BLIs, le recyclage et la future demande dans le reste du monde et secteurs industriels¹⁹, comme le montre la figure suivante (le diagramme stock & flux est illustré en annexe B.4.2.4).

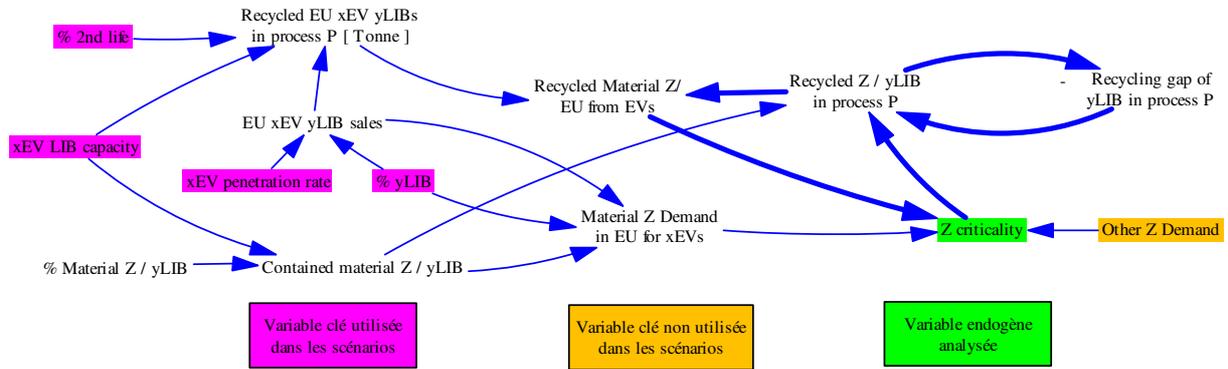


Figure 4.6. Diagramme simplifié des variables intervenant dans l'analyse de la criticité géologique des matières.

Dans un premier temps, nous avons analysé l'effet des BLIs en Europe, sans le recyclage. Pour ce faire, nous avons considéré les cas extrêmes. Les scénarios pessimistes (consommateurs en matières) sont représentés par **S1** (pour les matières : Al, Cu, Li, Ni, Co, Mn, C) et **S3** (pour les matières : Fe, P). Les scénarios optimistes (moins consommateurs en matières) sont représentés par **S6** (pour les matières : Al, Cu, Li, Ni, Co, Mn, C) et **S4** (pour les matières : Fe, P). A titre d'exemple, la figure suivante illustre le résultat obtenu dans le modèle DS sur la consommation des réserves du cobalt pour les BLIs EU. Le reste des résultats sont récapitulés au Tableau 4.12.

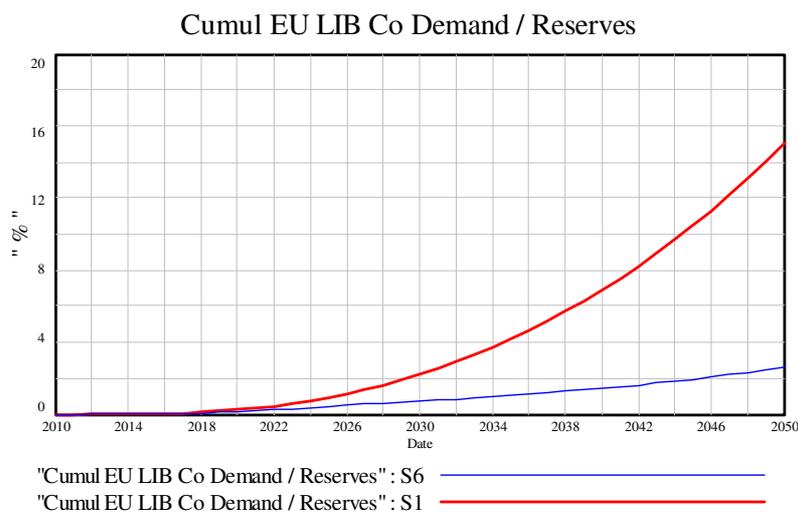


Figure 4.7. Consommation des réserves de cobalt pour les BLIs EU dans les scénarios S1/S6.

¹⁹ Nous rappelons qu'il s'agit de la future demande pour les différentes matières présentes dans la BLI; hors véhicules électriques en Europe, satisfaite par la production minière (B.4.1.5.1).

Matière	Scénarios pessimistes : S1 & S3		Scénarios optimistes: S6 & S4	
	Conso des réserves pour les BLIs EU (2010 => 2030)	Conso des réserves pour les BLIs EU (2010 => 2050)	Conso des réserves pour les BLIs EU (2010 => 2030)	Conso des réserves pour les BLIs EU (2010 => 2050)
Li	0,48%	3,32%	0,26%	1,50%
Ni	0,19%	1,35%	0,07%	0,23%
Mn	0,03%	0,18%	0,01%	0,03%
Co	2,22%	15,09%	0,74%	2,62%
Cu	0,07%	0,47%	0,04%	0,28%
Al	0,0012%	0,008%	0,0008%	0,005%
C	0,62%	4,23%	0,39%	2,50%
Fe	0,002%	0,014%	0,001%	0,008%
P	0,0002%	0,0015%	0,00004%	0,0002%

Tableau 4.12. Consommation des réserves matières pour les besoins de l'électromobilité en Europe.

Ces colonnes traduisent le rapport entre la demande cumulée d'une matière pour les besoins des BLIs en Europe et ses réserves. A l'exception du **cobalt** dans **S1**, aucune autre matière ne présente un risque de criticité géologique dû au développement des VEs.

Le tableau ci-dessus ne prend pas en compte le recyclage des BLIs en Europe, qui a pour effet la diminution de la consommation des réserves. Pour analyser cet effet, nous nous sommes placés dans le cas pessimiste (S1 et S3), c'est dans ce dernier que nous avons détecté une criticité géologique potentielle du cobalt. Dans le tableau ci-dessus, nous avons reporté les taux de recyclage 'théoriques' de ces matières (Tableau B.17, B.4.1.4).

Scénario	Matière	Taux de recyclage théorique	Conso des réserves pour les BLIs EU (2010 => 2050) sans le recyclage	Conso des réserves pour les BLIs EU (2010 => 2050) avec le recyclage	Taux de réduction par le recyclage (2010 => 2050)
S1	Li	90%	3,32%	3,32%	0,00%
	Ni	90%	1,35%	0,93%	31,11%
	Mn	90%	0,18%	0,12%	33,33%
	Co	90%	15,09%	10,39%	31,15%
	Cu	95%	0,47%	0,32%	31,91%
	Al	95%	0,008%	0,006%	20,00%
	C	50%	4,23%	4,23%	0,00%
S3	Fe	90%	0,014%	0,008%	44,29%
	P	50%	0,0015%	0,0013%	13,33%

Tableau 4.13. Consommation des réserves matières pour les VEs en Europe et effet de leur recyclage.

Le recyclage effectif de ces matières est indiqué à la dernière colonne, il est régi par les équations et boucles de rétroaction du modèle DS (B.4.1.4). Nous remarquons que le recyclage permet de réduire, d'une manière non négligeable, la consommation de certaines matières (Ni, Mn, Cu, Al, Fe) pour les BLIs en Europe, même si ces dernières ne présentent pas un risque de criticité géologique, dû au développement des VEs. Concernant le Cobalt,

même avec le recyclage, 10% des réserves auront été consommées à l'horizon 2050. En additionnant la demande en cobalt pour les BLIs du reste du monde et la demande pour les autres secteurs industriels, on peut s'attendre à une consommation des réserves plus forte. C'est justement l'objet de la section suivante.

A présent, nous allons conjuguer l'effet de la demande pour les BLIs avec le reste des demandes, y compris BLIs hors Europe. Pour ce faire, nous considérons uniquement S1 et S3 pour la demande provenant de l'électromobilité. Pour les autres demandes, nous considérons trois situations, stagnation (+0% / an), augmentation modérée (+2% / an) et forte augmentation (+5% / an). Le recyclage est inclus dans tous les cas. La stagnation de la demande (+0% / an) est une situation plutôt optimiste, considérant l'historique des cinq dernières années (B.4.1.5.1).

Scénario	Matière	+ 0% / an	+ 2% / an	+ 5% / an
S1	Li	11,57%	15,82%	28,39%
	Ni	79,45%	119,49%	238,05%
	Mn	97,66%	147,42%	294,70%
	Co	59,70%	84,86%	159,30%
	Cu	91,17%	137,51%	274,70%
	Al	5,80%	8,80%	17,60%
	C	37,86%	55,02%	105,80%
S3	Fe	52,42%	79,15%	158,29%
	P	10,80%	16,31%	32,63%

Tableau 4.14. Consommation globale (BLIs + Autres demandes) des réserves matières.

En analysant les trois profils de demandes, nous concluons que les matières (Li, Al, et P) ne présentent pas un risque de criticité géologique. Le reste des matières (Ni, Mn, Co, Cu, C, Fe) présentent ce risque et nécessitent des stratégies de mitigation (atténuation d'un risque). Le cobalt est la seule matière qui contribue à ce risque à travers le développement de l'électromobilité (Tableau 4.13). Les stratégies de mitigation sont par conséquent à développer en dehors du secteur automobile (augmentation du taux de recyclage, substitution, exploration de nouvelles réserves, etc.).

Avant de conclure sur la criticité géologique des matières, nous présentons une dernière analyse concernant la capacité de la production à satisfaire la future demande, surtout en cas d'augmentation soudaine liée au déploiement des VEs. Nous nous y intéressons à cause de la lenteur de ce processus, de l'ordre de 5 à 10 ans pour l'ouverture d'une nouvelle mine (Miedema and Moll, 2013; Novinsky et al., 2014). Le tableau suivant indique le taux de croissance annuel moyen (*Compound annual growth rate* = CAGR) nécessaire, par rapport à

celui de 2010, pour satisfaire juste les besoins des BLIs en Europe, en considérant le recyclage.

Matière	Prod_2010 (M t / an)	Pessimiste : S1 & S3				Optimiste: S6 & S4			
		Demande EU BLIs 2030 / Prod_2010	Demande EU BLIs 2050 / Prod_2010	CAGR 2010- 2030	CAGR 2010- 2050	Demande EU BLIs 2030 / Prod_2010	Demande EU BLIs 2050 / Prod_2010	CAGR 2010- 2030	CAGR 2010- 2050
Li	0,028	36,66%	109,67%	1,57%	1,87%	14,83%	40,92%	0,69%	0,86%
Ni	1,59	1,42%	2,66%	0,07%	0,07%	0,17%	0,34%	0,01%	0,01%
Mn	13,9	0,17%	0,28%	0,01%	0,01%	0,03%	0,04%	0,001%	0,001%
Co	0,09	25,33%	47,15%	1,14%	0,97%	3,02%	5,96%	0,15%	0,14%
Cu	15,9	0,43%	0,77%	0,02%	0,02%	0,20%	0,38%	0,01%	0,01%
Al	40,8	0,12%	0,27%	0,01%	0,01%	0,06%	0,15%	0,003%	0,004%
C	0,925	11,64%	35,67%	0,55%	0,77%	6,99%	21,54%	0,34%	0,49%
Fe	1 140	0,025%	0,078%	0,001%	0,002%	0,0014%	0,0417%	0,00%	0,001%
P	181	0,013%	0,035%	0,00%	0,00%	0,0019%	0,0055%	0,00%	0,00%

Tableau 4.15. Production des matières pour les besoins de l'électromobilité en Europe.

Pour toutes les matières, nous remarquons que le rythme d'augmentation de la production avant 2030 est plus faible que celui entre 2030 et 2050. Cela s'explique par les taux de pénétrations des VEs sur ces deux périodes.

Les demandes des matières (Ni, Mn, Cu, Al, Fe et P) pour les BLIs, représentent une part négligeable de leurs productions en 2010, même dans le cas pessimiste. Par conséquent, ce n'est pas le développement des BLIs qui induira un risque de déficit de la production de ces matières.

Le lithium, le cobalt et le graphite apparaissent comme les seules matières nécessitant des efforts d'ouverture de nouvelles mines. A titre d'exemple, la production du lithium doit être augmentée pratiquement de 2% /an (1% /an) pour les besoins des BLIs en Europe, dans le cas pessimiste (optimiste). En ajoutant la demande pour les BLIs dans le reste du monde et la demande des autres secteurs industriels, on peut s'attendre à un niveau d'augmentation nécessaire allant jusqu'à 10% /an.

L'augmentation de la production de ces matières doit donc être anticipée. Il faudra s'assurer que les niveaux de productions requis en 2020 et 2025 soient en développement actuellement. Cependant, nous ne disposons pas d'informations sur les capacités prospectives des sociétés minières, afin de mener une telle vérification.

Dans cette analyse sur la criticité géologique des matières, nous concluons que **pour les besoins des BLIs**, seule l'utilisation du **cobalt** est susceptible d'épuiser une grande partie des réserves. Concernant l'augmentation du niveau de production, c'est **le lithium, le cobalt et le graphite** qui sont susceptibles de poser le plus de challenge. Cependant, pour bien conclure sur la criticité géologique globale des matières, des **analyses approfondies considérant les autres secteurs d'utilisation** (future demande, substituabilité, etc.) sont nécessaires. En plus de la criticité géologique, **d'autres facteurs de risques** doivent être considérés, notamment la concentration géographique de ces matières et les risques géopolitiques associés.

4.3 Analyse des procédés de recyclage

Dans cette section, nous nous intéressons aux deux procédés de recyclage retenus (Figure 4.10). L'objectif étant, d'une part, de disposer des éléments de comparaison entre les deux procédés et, d'autre part, de tenir compte des motivations de valorisation réglementaires et économiques (s'assurer que le taux de recyclage est supérieur à 50% de la masse de la BLI et minimiser le coût de la fin de vie et global de la BLI). Ainsi, nous investiguons :

- Les taux et revenus de recyclage atteints par les BLIs dans les deux procédés ;
- Le coût de recyclage dans les deux procédés.

Dans le modèle DS, nous analysons les dynamiques : satisfaction du taux de recyclage réglementaire et rentabilité du recyclage (les diagrammes stock & flux sont illustrés en annexes B.4.2.5, B.4.2.6).

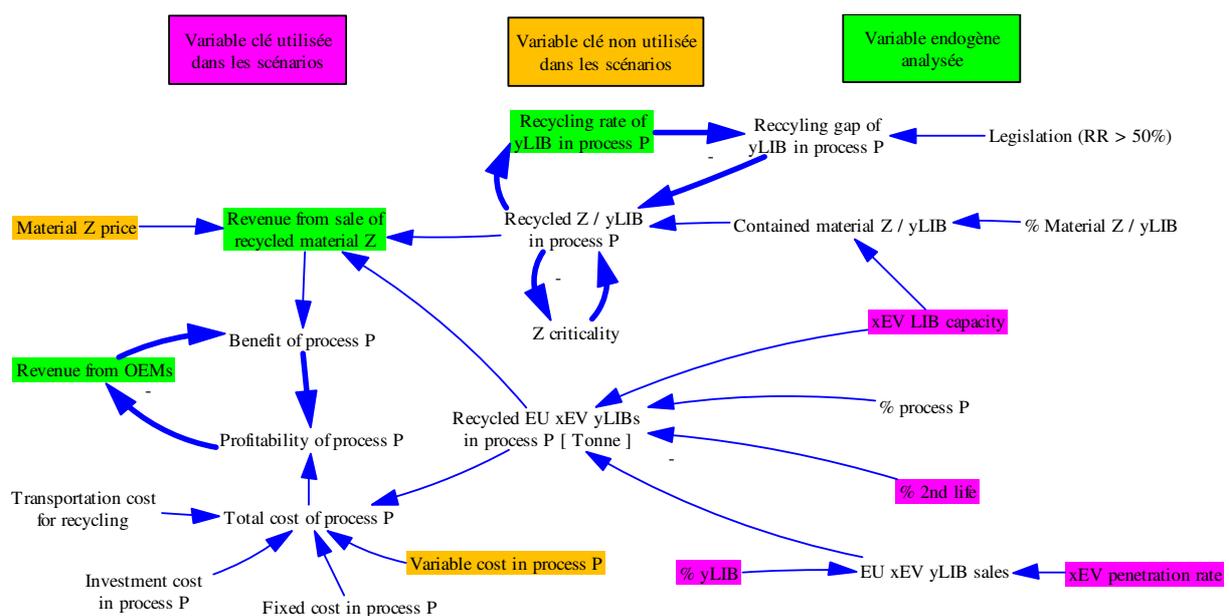


Figure 4.8. Diagramme simplifié des variables intervenant dans l'analyse des procédés de recyclage.

Avant d'exposer ces analyses nous rappelons quelques éléments sur les technologies BLI (1.4) et de recyclage (B.1).

4.3.1 Rappels sur les technologies BLI et de recyclage

Une BLI est composée de la partie électrochimique (cellules) et de la partie support (BMS, câbles de connexion et le circuit de refroidissement).

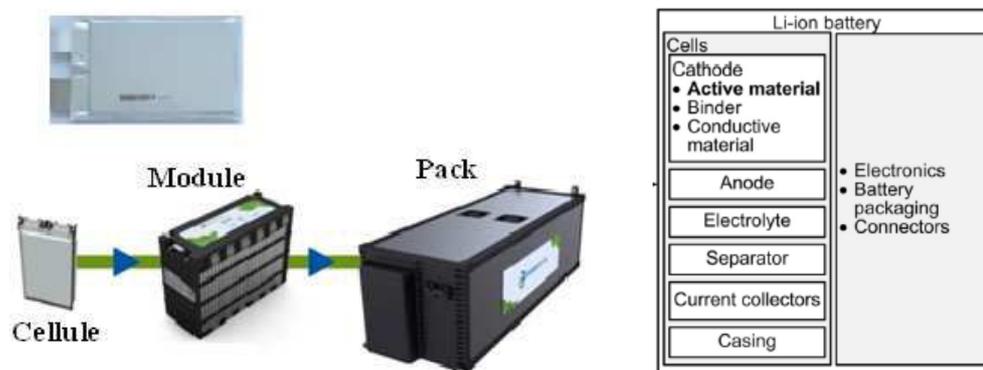


Figure 4.9. Décomposition et Composition d'une batterie. (Swart et al., 2014; Väyrynen and Salminen, 2012).

C'est la cathode qui présente la plus grande variabilité parmi les éléments d'une BLI. C'est elle aussi qui définit son nom. Dans ce travail, nous avons retenu les technologies NMC ($\text{LiNi}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{O}_2$) et LFP (LiFePO_4), leurs compositions type sont indiquées ci-dessus.

Matière	% dans pack NMC	% dans cellules NMC	% dans pack LFP	% dans cellules LFP
Acier	28,8%	7,3%	28,8%	7,3%
Plastique	15,0%	7,5%	15,0%	7,5%
Cu	9,0%	10,0%	9,0%	10,0%
Al	6,3%	7,0%	6,3%	7,0%
C	12,6%	21,0%	12,6%	21,0%
Electrolyte	10,0%	16,7%	10,0%	16,7%
Ni	3,7%	6,2%		
Mn	3,5%	5,8%		
Co	3,7%	6,2%		
Li	1,3%	2,2%	0,8%	1,3%
O	6,1%	10,1%	7,4%	12,4%
Fe			6,5%	10,8%
P			3,6%	6,0%
Total	100%	100%	100%	100%

Tableau 4.16. Décomposition analytique d'une batterie NMC ($\text{LiMnNiCo}_{(0,33)}\text{O}_2$) et LFP ($\text{Li}_1\text{Fe}_1\text{P}_1\text{O}_4$). (B.4.1.3.5)

Pour le recyclage de ces matières, nous avons identifié et retenu deux procédés.

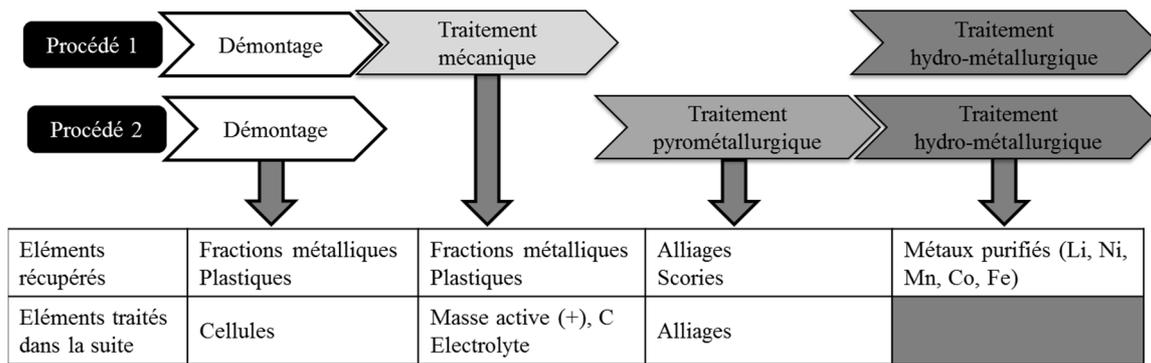


Figure 4.10. Rappel des deux procédés de recyclage considérés.

Après avoir exposé ces éléments, nous allons nous intéresser aux taux et revenus de recyclage atteints par les deux BLIs (NMC, LFP) dans les deux procédés (P1, P2).

4.3.2 Taux et revenus de recyclage par procédé

Les figures suivantes illustrent les taux de recyclage atteints pour les BLIs NMC et LFP dans les deux procédés, à travers les six scénarios (Tableau 4.9).

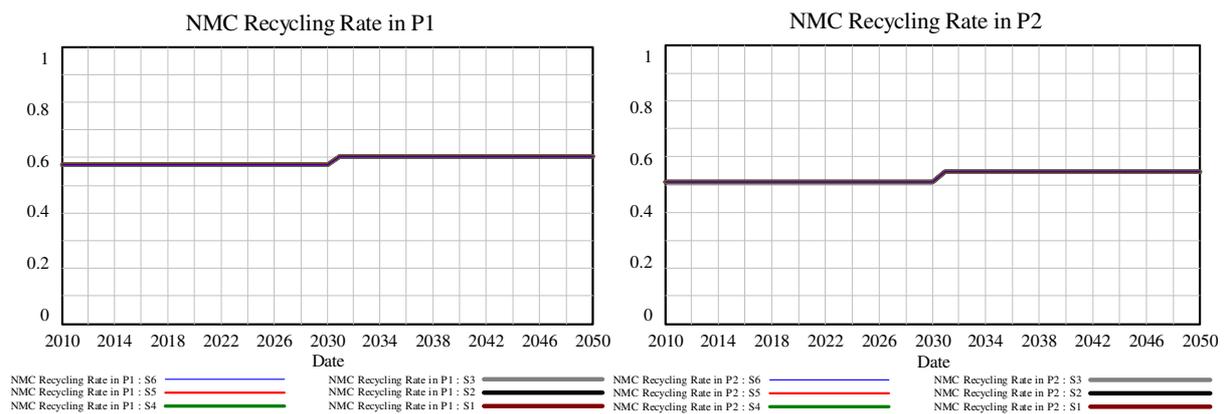


Figure 4.11. Taux de recyclage des BLIs NMC.

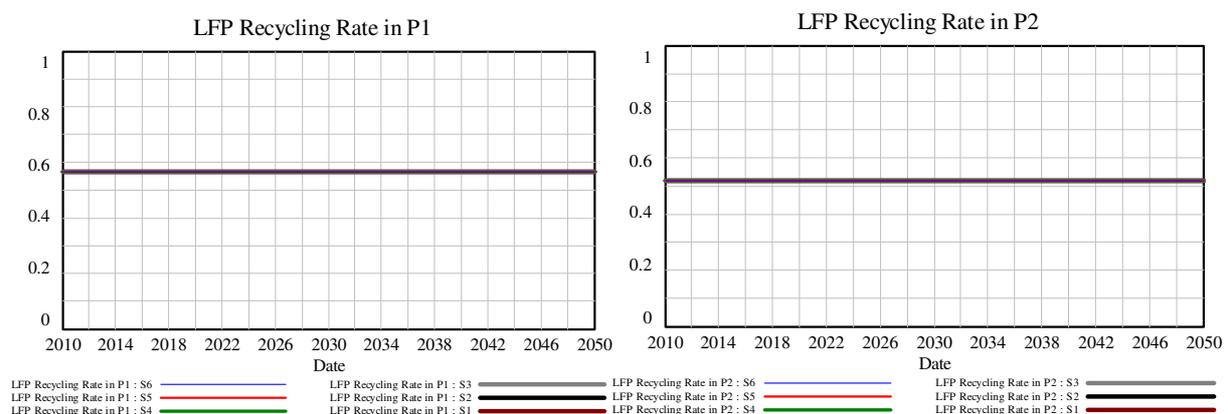


Figure 4.12. Taux de recyclage des BLIs LFP.

Tout d'abord, nous remarquons que les quatre taux recyclage sont identiques à travers les six scénarios. Cela s'explique par notre analyse précédente sur la criticité. A l'exception du

cobalt, qui est déjà recyclé, la criticité des autres matières n'est pas affectée par le développement de l'électromobilité, par conséquent par les différents scénarios (S1, S2, etc.).

Ensuite, nous remarquons que seules les BLIs NMC ont un taux de recyclage qui évolue dans le temps. Cela s'explique également par notre analyse précédente sur la criticité. Au Tableau 4.14, nous avons identifié les matières (Ni, Mn, Co, Cu et Fe) comme potentiellement critiques du fait de l'augmentation de la demande dans les autres secteurs. Toutes ces matières sont déjà recyclées, à l'exception du manganèse, pour qui 50% des réserves auront été consommées en 2030. Il s'agit du seuil de criticité que nous avons défini (B.4.1.4), justifiant le recyclage d'une matière qui ne l'était pas auparavant. C'est cela qui explique l'augmentation du taux de recyclage NMC à partir de 2030.

Enfin, nous constatons que pour les deux BLIs (NMC et LFP), les taux de recyclage dans P1 sont supérieurs à ceux dans P2. Cela s'explique par la contribution des matières plastiques et de l'aluminium dans ces derniers. Dans P2, les matières plastiques sont valorisées énergétiquement et l'Aluminium se retrouve dans les scories (déchets du traitement des métaux).

En ce qui concerne les revenus de revente des matières recyclées, ils sont illustrés au tableau suivant. Pour le calcul de ces derniers, nous avons considéré des prix de revente fixes dans le temps, en s'appuyant sur leurs historiques, comme le montre l'annexe (C.1.1). Une analyse de sensibilité sur ces prix est présentée à la section (4.3.3.3.2).

	100% NMC	100% LFP	80% NMC, 20 %LFP (S1, S4)	50% NMC, 50 %LFP (S2, S5)	20% NMC, 80 %LFP (S3, S6)
P1 (€/t)	1 569 €	593 €	1 374 €	1 081 €	788 €
P2 (€/t)	1 555 €	522 €	1 348 €	1 039 €	729 €

Tableau 4.17. Revenus/tonne des BLIs NMC & LFP dans P1 & P2.

Les deux premières colonnes indiquent le revenu de recyclage d'une tonne de BLI NMC ou LFP. Les trois dernières colonnes indiquent le revenu moyen d'une tonne qui contient des BLIs NMC et LFP dans les proportions indiquées.

Nous remarquons qu'il y a une faible différence entre les revenus dans P1 et P2. Les revenus NMC sont plus importants que ceux des LFP, grâce aux matières nickel et cobalt. A terme, ces revenus peuvent varier entre 729 €/t et 1374 €/t.

Pour les différents taux et revenus de recyclage, nous allons investiguer la contribution des matières contenues dans la BLI. Pour rappel, les taux et revenus de recyclage des BLIs NMC et LFP dans les deux procédés sont récapitulés dans le tableau suivant :

	Taux de recyclage P1	Taux de recyclage P2	Revenu P1	Revenu P2
NMC	60,5%	54,4%	1 569 €	1 555 €
LFP	56,5%	51%	593 €	522 €

Tableau 4.18. Taux et revenus de recyclage des BLIs NMC & LFP dans P1 & P2.

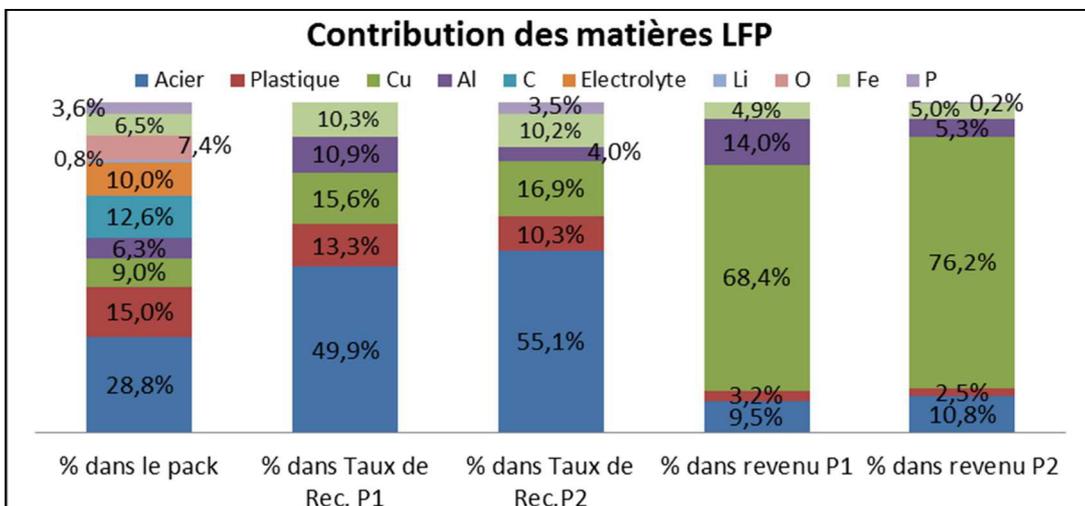
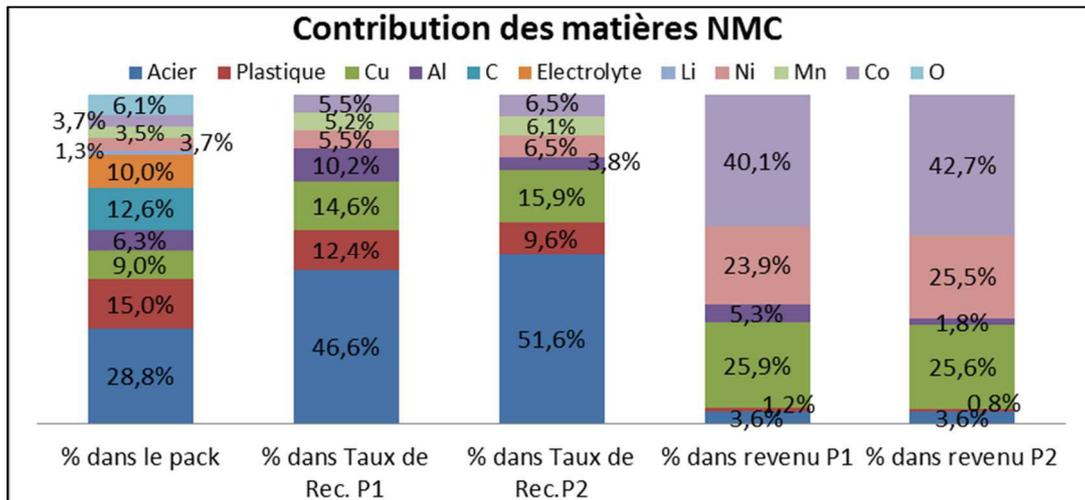


Figure 4.13. Contribution des matières d'une BLI NMC et LFP aux taux et revenus de recyclage dans P1 et P2.

Concernant les taux de recyclage, nous remarquons que l'acier est la matière qui contribue le plus à ces derniers. Les trois matières (acier, cuivre, plastique) contribuent à elles seules à plus de 75% du taux de recyclage de la batterie. A l'inverse, les matières contenues dans la masse active positive (Ni, Mn et Co pour NMC, Fe et P pour LFP) y contribuent pour moins de 15%. Pour les revenus des BLIs NMC, les trois matières (Cu, Ni et Co) contribuent à elles

seules à 90% de ces derniers. Pour ceux des BLIs LFP, c'est le cuivre qui contribue le plus aux revenus.

A l'exception du cuivre, qui contribue au taux et au revenu de recyclage, nous distinguons deux profils de matières. Celles qui sont récupérées en début du procédé de recyclage et qui contribuent principalement au taux de recyclage et peu au revenu, à l'inverse de celles qui sont récupérées au bout du procédé. La contribution des opérations élémentaires des deux procédés aux taux et revenus de recyclage des deux BLIs est exposée en annexe (C.1.2), la figure suivante donne un exemple pour les BLIs NMC dans P1.

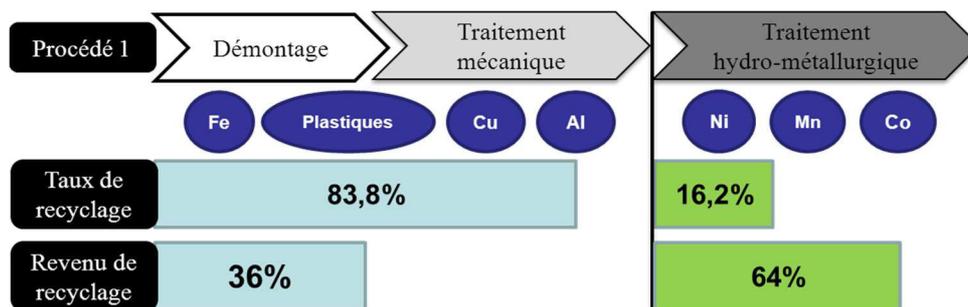


Figure 4.14. Contribution des opérations de P1 au taux et au revenu de recyclage des BLIs NMC.

4.3.3 Coût de recyclage par procédé

Nous appelons **coût de recyclage**, le coût qui sera supporté par le constructeur automobile pour le recyclage de ses BLIs hors transport, à ne pas confondre avec le coût variable de recyclage (B.4.1.6.1). Ce coût de recyclage est positif si le revenu de vente des matières recyclées ne garantit pas à lui seul la rentabilité de l'activité de recyclage (hors transport). Nous introduisons également le **coût de recyclage global**, qui inclut le coût de recyclage et de transport.

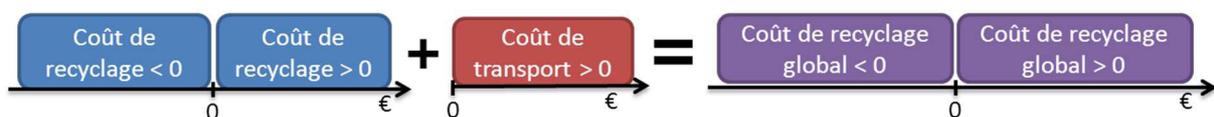


Figure 4.15. Coût de recyclage et coût de recyclage global

Ces deux coûts peuvent être positifs ou négatifs. Dans le cas où ils sont positifs, ils vont augmenter le coût de la fin de vie et global de la BLI. Dans le cas contraire, ils impliquent que le constructeur va recevoir une rétribution du revenu de recyclage, ce qui diminue le coût de la fin de vie et global de la BLI.

Nous avons calculé un coût de recyclage qui permet de rentabiliser les investissements (B.4.1.6.1, Tableau B.24) sur une période qui est de l'ordre de 5 ans, et une productivité du

capital de l'ordre de 2 sur 20 ans. Nous avons utilisé un taux d'actualisation de 8% (Hein et al., 2012; Hoyer et al., 2014; Neubauer et al., 2012). Ce coût sera analysé dans P1 puis P2, avec des analyses de sensibilité pour chacun. Nous baserons nos analyses sur les six scénarios rappelés dans la figure suivante.

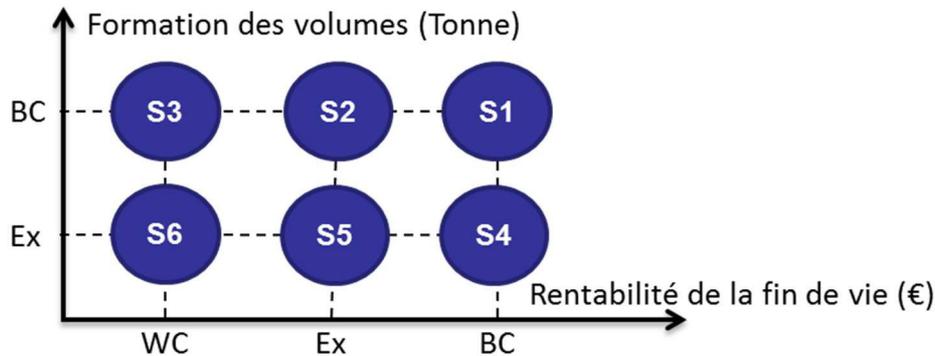


Figure 4.16. Rappel des six scénarios analysés. (BC=Best case, Ex = Expected, WC = Worst case)

4.3.3.1 Coût de recyclage dans P1

La figure ci-dessous traduit l'évolution du taux d'utilisation des unités de P1 avec l'arrivée des volumes à traiter.

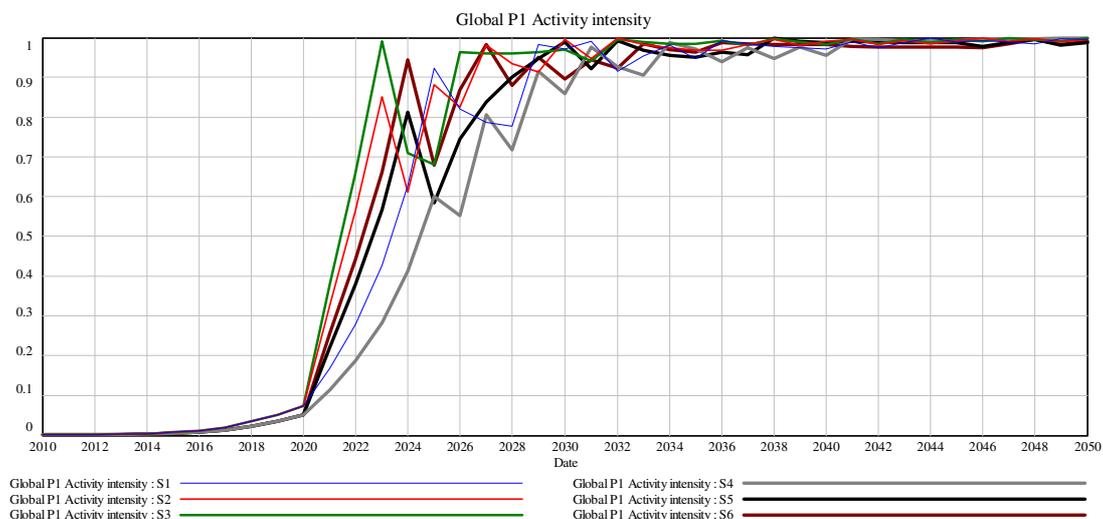


Figure 4.17. Taux d'utilisation des unités de P1 dans les six scénarios.

Cette figure fournit deux indications sur l'évolution du coût de recyclage par l'effet volume. Dans les premières années, ces scénarios s'approchent d'une utilisation maximale des unités dans l'ordre suivant : S3, S2, S6, S5, S1 puis S4. Ainsi, on peut s'attendre à ce que les coûts de recyclage initiaux soient classés dans cet ordre-là. Cela est confirmé dans la Figure 4.18. La deuxième indication concerne l'horizon de stabilisation du coût de recyclage. Nous remarquons que toutes les courbes convergent vers 1 en 2030. On peut déduire que le coût de recyclage se stabilisera à cet horizon, comme le montre la Figure 4.18.

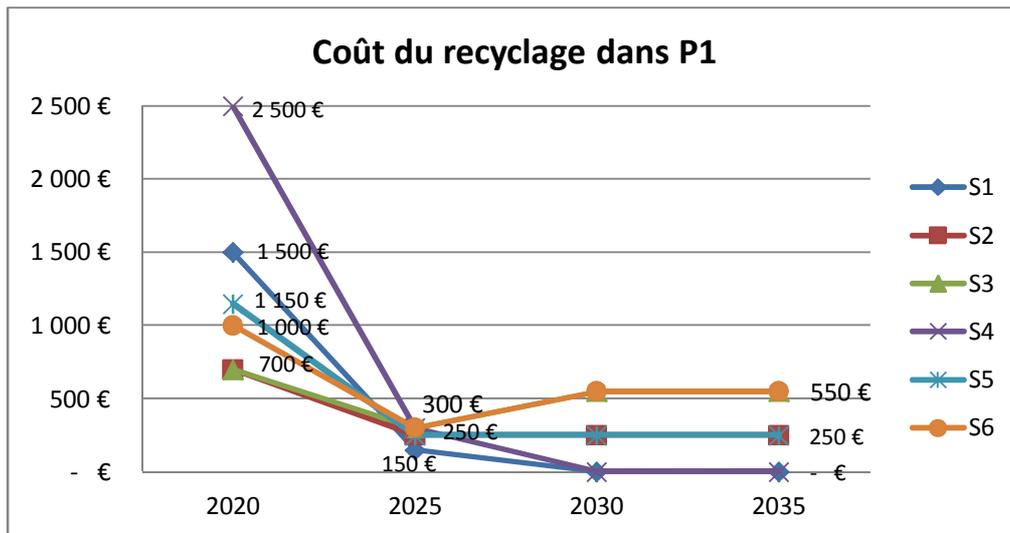


Figure 4.18. Evolution du coût de recyclage dans P1 dans les six scénarios.

En 2020, nous retrouvons le classement des coûts indiqué ci-dessus, avec un coût de recyclage maximal de 2500 €/t pour S4. Pour les six scénarios, nous constatons une baisse du coût de recyclage entre 2020 et 2025. A partir de 2025, nous observons trois tendances : baisse pour la paire (S1 et S4), stagnation pour (S2 et S5) et augmentation pour (S3 et S6). La stagnation et augmentation du coût dans S2/S5, S3/S6 respectivement, est due à l'augmentation de la proportion des BLIs LFP au détriment des NMC.

Chacun des deux scénarios composant une paire (S1/S4, S2/S5, S3/S6) s'est stabilisé au même niveau, 0 €/t, 250 €/t et 550 €/t. La constitution des paires de scénarios est due au revenus de recyclage identiques dans chaque paire (Tableau 4.17), 1374 €/t dans S1/S4, 1081 €/t dans S2/S4 et 788 €/t dans S3/S6. La différence entre les trois revenus explique celle du coût de recyclage à terme.

4.3.3.2 Coût de recyclage dans P2

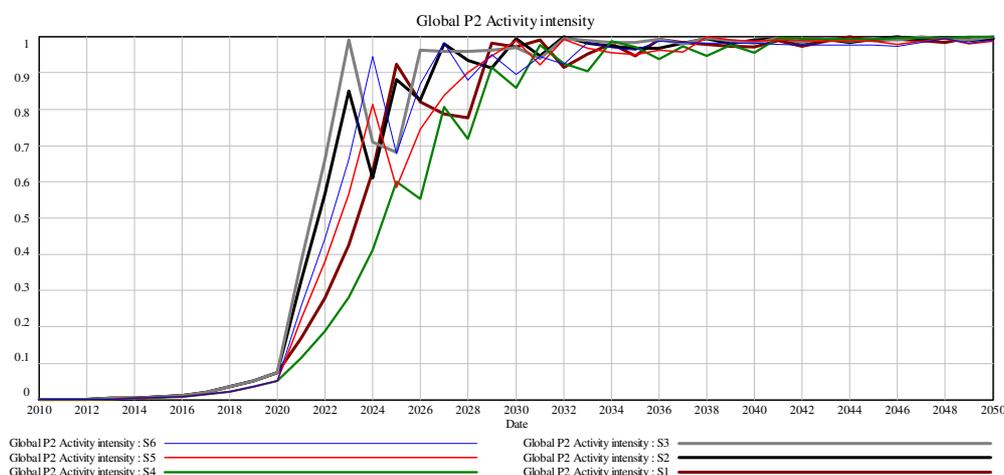


Figure 4.19. Taux d'utilisation des unités de P2 dans les six scénarios.

Pour P2, nous retrouvons le même classement que P1 concernant le taux d'utilisation des unités: S3, S2, S6, S5, S1 puis S4. Nous remarquons également que toutes les courbes convergent vers 1 en 2030. On peut déduire que le coût de recyclage se stabilisera à cet horizon, comme le montre la figure ci-dessus.

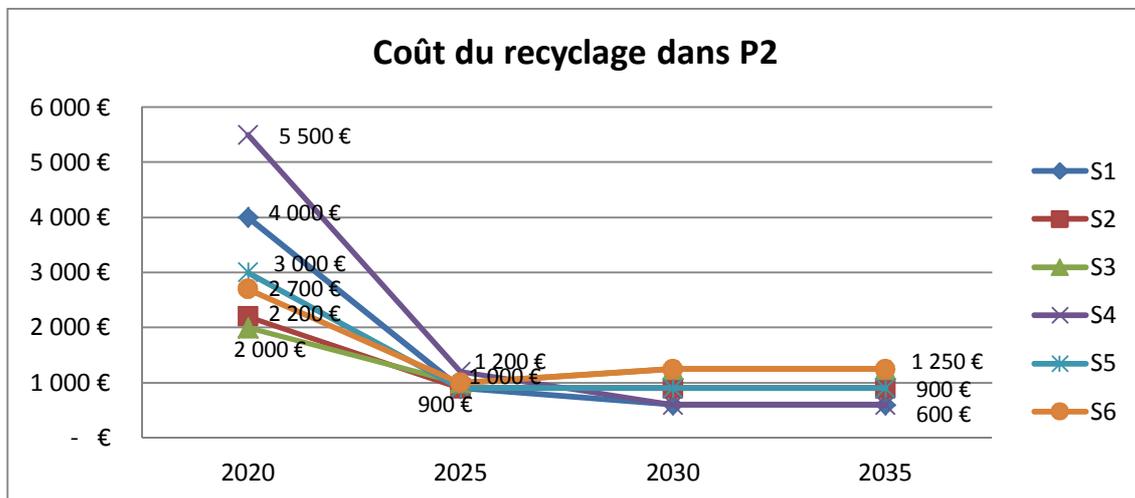


Figure 4.20. Evolution du coût de recyclage dans P2 dans les six scénarios.

A l'instar de P1, nous observons les mêmes tendances. La différence se situe dans les coûts de recyclage initiaux et à terme. Le coût de recyclage maximal est de 5500 €/t pour S4 en 2020. A terme, le coût de recyclage se stabilise à 600 €/t dans S1/S4, à 900 €/t dans S2/S5 et à 1250 €/t dans S3/S6. La différence entre les revenus des trois paires (1348 €/t, 1039 €/t et 729 €/t) explique celle du coût de recyclage à terme.

Le coût de recyclage dans P2 est supérieur à celui de P1 avec une différence de l'ordre de 600-700 €/t. Cela s'explique par l'opération de pyrométallurgie qui nécessite un investissement plus élevé que celui du traitement mécanique.

4.3.3.3 Analyse de sensibilité du coût de recyclage par procédé

A travers les six scénarios, le coût de recyclage (hors transport) reste positif dans les deux procédés, ce qui induit une augmentation du coût de la fin de vie de la BLI. Afin de vérifier la robustesse de cette conclusion, nous procédons à une analyse de sensibilité de ce coût.

Au Tableau 4.2, nous avons identifié les variables clés qui interviennent dans la dynamique de rentabilité du recyclage. Les variables 'coût variable de recyclage' (*variable cost in process P*) et 'prix de revente des matières recyclées' (*Material Z price*) ont une valeur fixe dans les six scénarios. Nous allons procéder à une analyse de sensibilité du coût de recyclage par rapport à ces deux variables.

Nous allons également analyser la sensibilité du coût de recyclage par rapport à deux éléments. Le premier est la variable « %2nd life », au cas où elle ne peut pas se développer pour des contraintes techniques. Le second est l'évolution de la technologie NMC vers un enrichissement nickel ($\text{LiNi}_{0.8}\text{Mn}_{0.1}\text{Co}_{0.1}\text{O}_2$) ou manganèse ($\text{LiNi}_{0.1}\text{Mn}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{O}_2$).

Le but premier de cette analyse de sensibilité n'est pas de mesurer son étendue, puisqu'il s'agit de variables clés dont l'influence a été prouvée. L'objectif est de savoir sous quelles conditions le recyclage pourrait être autofinancé avec juste le revenu de revente des matières recyclées, voire générer de la valeur pour le constructeur automobile.

Les valeurs des six scénarios avant l'analyse de sensibilité sont appelées 'Référence'.

4.3.3.3.1 Coût variable de recyclage

Nous avons analysé l'effet d'une diminution et d'une augmentation de 50% du coût variable de recyclage. Les résultats sont récapitulés au tableau suivant pour les deux procédés.

		Coût de recyclage P1			Coût de recyclage P2		
		2020	2025	2030	2020	2025	2030
Coût variable de recyclage							
S1	Référence	1 500 €	150 €	- €	4 000 €	900 €	600 €
	-50%	1 300 €	- 200 €	- 350 €	3 700 €	600 €	250 €
	+50%	1 900 €	400 €	300 €	4 300 €	1 200 €	900 €
S2	Référence	700 €	250 €	250 €	2 200 €	900 €	900 €
	-50%	400 €	- 50 €	- 50 €	1 900 €	600 €	600 €
	+50%	1 000 €	550 €	550 €	2 500 €	1 200 €	1 200 €
S3	Référence	700 €	300 €	550 €	2 000 €	1 000 €	1 250 €
	-50%	400 €	- €	250 €	1 700 €	700 €	950 €
	+50%	1 000 €	600 €	850 €	2 300 €	1 300 €	1 600 €
S4	Référence	2 500 €	300 €	- €	5 500 €	1 200 €	600 €
	-50%	2 300 €	- €	- 350 €	5 300 €	900 €	250 €
	+50%	2 900 €	550 €	300 €	5 900 €	1 500 €	900 €
S5	Référence	1 150 €	250 €	250 €	3 000 €	900 €	900 €
	-50%	800 €	- 50 €	- 50 €	2 700 €	600 €	600 €
	+50%	1 450 €	550 €	550 €	3 300 €	1 200 €	1 200 €
S6	Référence	1 000 €	300 €	550 €	2 700 €	1 000 €	1 250 €
	-50%	700 €	- €	250 €	2 400 €	800 €	950 €
	+50%	1 300 €	700 €	850 €	3 000 €	1 400 €	1 600 €

Tableau 4.19. Sensibilité du coût de recyclage dans P1/P2, par rapport au coût variable de recyclage.

Nous constatons qu'une augmentation ou diminution du coût variable de recyclage induit une différence de l'ordre de **300-400€** pour les deux procédés. Les coûts de recyclage étant plus

petits dans P1 par rapport à P2, dans S1/S4 par rapport aux autres scénarios, cette sensibilité y est plus importante, comme le montre le tableau suivant.

	S1/S4	S2/S5	S3/S6
P1	± 325%	± 120%	± 55%
P2	± 54%	± 33%	± 26%

Tableau 4.20. Sensibilité du coût de recyclage en 2030 dans P1/P2, par rapport au coût variable de recyclage.

Le coût de recyclage initial maximal reste toujours dans S4 : 2 900 €/t pour P1 et 5 900 €/t pour P2. Le coût de recyclage à terme minimal reste toujours dans S1/S4 : -350 €/t pour P1 et 250 €/t pour P2. **En incluant le coût de transport (4.1.1.6), le recyclage sera un coût net de la fin de vie de la BLI, dans tous les scénarios et toutes les périodes.**

4.3.3.3.2 Prix de revente des matières recyclées

Nous avons analysé l'effet d'une augmentation annuelle de 1% et 2% du prix de revente des matières recyclées. Les résultats sont récapitulés au tableau suivant pour les deux procédés.

	Prix matières	Coût de recyclage P1			Coût de recyclage P2		
		2020	2025	2030	2020	2025	2030
S1	Référence	1 500 €	150 €	- €	4 000 €	900 €	600 €
	+ 1% / an	1 500 €	- 100 €	- 450 €	4 000 €	650 €	100 €
	+ 2% / an	1 500 €	- 400 €	- 1 000 €	4 000 €	400 €	- 550 €
S2	Référence	700 €	250 €	250 €	2 200 €	900 €	900 €
	+ 1% / an	700 €	- 50 €	- 100 €	2 200 €	600 €	550 €
	+ 2% / an	500 €	- 300 €	- 500 €	2 000 €	350 €	50 €
S3	Référence	700 €	300 €	550 €	2 000 €	1 000 €	1 250 €
	+ 1% / an	600 €	100 €	300 €	1 800 €	900 €	1 050 €
	+ 2% / an	450 €	- 100 €	- €	1 600 €	600 €	700 €
S4	Référence	2 500 €	300 €	- €	5 500 €	1 200 €	600 €
	+ 1% / an	2 500 €	50 €	- 450 €	5 500 €	950 €	100 €
	+ 2% / an	2 500 €	- 250 €	- 1 000 €	5 500 €	700 €	- 550 €
S5	Référence	1 150 €	250 €	250 €	3 000 €	900 €	900 €
	+ 1% / an	1 150 €	50 €	- 100 €	3 000 €	550 €	550 €
	+ 2% / an	1 000 €	- 200 €	- 500 €	2 700 €	300 €	50 €
S6	Référence	1 000 €	300 €	550 €	2 700 €	1 000 €	1 250 €
	+ 1% / an	850 €	100 €	300 €	2 500 €	900 €	1 050 €
	+ 2% / an	700 €	- 50 €	- €	2 300 €	700 €	700 €

Tableau 4.21. Sensibilité du coût de recyclage dans P1/P2, par rapport au prix de revente des matières recyclées.

En 2020, nous constatons qu'une augmentation annuelle de 1% n'a d'effet que sur le coût dans S3/S6, pour lesquels il n'y a pas de 2^{nde} vie. Même avec une augmentation annuelle de 2%, le coût en 2020 pour S1/S4 reste inchangé. Pour 2025 et 2030, le tableau suivant synthétise l'effet de l'augmentation du prix de revente des matières recyclées.

	+ 1% / an		+ 2% / an	
	2025	2030	2025	2030
P1	200 – 300 €	250- 450 €	250 – 550 €	550- 1000 €
P2	100 – 350 €	200- 500 €	300 – 600 €	550- 1150 €

Tableau 4.22. Intervalle de diminution du coût de recyclage en fonction du prix de revente des matières recyclées.

Le coût de recyclage initial maximal reste toujours dans S4 : 2 500 €/t pour P1 et 5 500 €/t pour P2. Le coût de recyclage à terme minimal reste toujours dans S1/S4 : -1 000 €/t pour P1 et - 550 €/t pour P2. **En incluant le coût de transport, le recyclage sera à l'équilibre (0 €/t) dans S1/S4 si le prix de revente des matières recyclées augmentait de 2% par année. Sinon, il subsistera un coût de recyclage global positif dans le reste des scénarios et périodes.**

4.3.3.3 La proportion du reconditionnement (%2^{nde} vie)

Nous avons analysé l'effet de la diminution de la proportion du reconditionnement à 20% et 0%. Nous rappelons que les scénarios S3/S6 ne sont pas concernés par cette analyse.

	% 2 ^{nde} vie	Coût de recyclage P1			Coût de recyclage P2		
		2020	2025	2030	2020	2025	2030
S1	Référence (80%)	1 500 €	150 €	- €	4 000 €	900 €	600 €
	20%	750 €	50 €	- €	2 100 €	800	600
	0%	700 €	- €	- €	2 000 €	600	600
S2	Référence (20%)	700 €	250 €	250 €	2 200 €	900 €	900 €
	0%	700 €	250 €	250 €	2 000 €	900	900
S4	Référence (80%)	2 500 €	300 €	- €	5 500 €	1 200 €	600 €
	20%	1 200 €	100 €	- €	2 600 €	800	600
	0%	1 000 €	100 €	- €	2 500 €	800	600
S5	Référence (20%)	1 150 €	250 €	250 €	3 000 €	900 €	900 €
	0%	950 €	250 €	250 €	2 800 €	900	900

Tableau 4.23. Sensibilité du coût de recyclage dans P1/P2, par rapport à la variable « % 2^{nde} vie ».

Nous remarquons que toutes les augmentations du coût de recyclage restent dans l'intervalle admissible défini au Tableau 4.5, garantissant un effet positif de la 2^{nde} vie sur le coût de la fin de vie de la BLI. **Pour tous les scénarios et tous les procédés, l'effet du reconditionnement s'estompe à partir de 2030, le coût de recyclage devient insensible à la réutilisation.**

Le coût de recyclage initial maximal est de 1 000 €/t pour S4/S6 dans P1, 2 800 €/t pour S5 dans P2. Le coût de recyclage minimal à terme reste toujours dans S1/S4 : 0 €/t pour P1 et 600 €/t pour P2. **En incluant le coût de transport, le recyclage sera un coût net de la fin de vie de la BLI, dans tous les scénarios et toutes les périodes.**

4.3.3.3.4 Evolution de la technologie NMC

Aujourd'hui, des efforts de R&D sont entrepris par les fabricants de batteries pour améliorer les performances des BLIs NMC. Deux directions sont explorées à cette fin : un enrichissement de la cathode en nickel ($\text{LiNi}_{0.8}\text{Mn}_{0.1}\text{Co}_{0.1}\text{O}_2$) ou en manganèse ($\text{LiNi}_{0.1}\text{Mn}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{O}_2$). Ainsi, nous allons analyser l'effet de cette évolution sur les coûts de recyclage.

	Enrichissement Nickel ($\text{LiNi}_{0.8}\text{Mn}_{0.1}\text{Co}_{0.1}\text{O}_2$)		Enrichissement Manganèse ($\text{LiNi}_{0.1}\text{Mn}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{O}_2$)	
	Dans P1 (€/t)	Dans P2 (€/t)	Dans P1 (€/t)	Dans P2 (€/t)
LFP	593 €	522 €	593 €	522 €
NMC référence ($\text{LiNi}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{O}_2$)	1 569 €	1 555 €	1 569 €	1 555 €
Evolution NMC (Ni ou Mn)	1 645 €	1 635 €	979 €	932 €
S1/S4 (évolution NMC)	1 435 €	1 412 €	902 €	850 €
S2/S5 (évolution NMC)	1 119 €	1 079 €	786 €	727 €
S3/S6 (évolution NMC)	803 €	745 €	670 €	604 €

Tableau 4.24. Revenus de recyclage avec l'évolution de la technologie NMC vers un enrichissement Ni ou Mn.

Les deux premières lignes indiquent les revenus des technologies de référence. La troisième ligne indique le revenu de la technologie NMC enrichie en nickel ou en manganèse.

Un enrichissement en nickel induit un meilleur revenu de recyclage des BLIs NMC. Cela est dû au prix élevé du nickel. Par conséquent, on peut s'attendre à une légère diminution des coûts de recyclage (moins de 60 €/t). A l'inverse, un enrichissement en manganèse dégrade le revenu de recyclage des BLIs NMC et on peut s'attendre à une augmentation des coûts de recyclage (120 - 485 €/t). Le tableau suivant récapitule cette sensibilité à terme.

	Enrichissement Ni ($\text{LiNi}_{0.8}\text{Mn}_{0.1}\text{Co}_{0.1}\text{O}_2$)			Enrichissement Mn ($\text{LiNi}_{0.1}\text{Mn}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{O}_2$)		
	S1/S4	S2/S5	S3/S6	S1/S4	S2/S5	S3/S6
P1	- 60%	- 15%	- 3%	+ 485%	+ 120%	+ 22%
P2	- 10%	- 4%	- 1%	+ 81%	+ 33%	+ 10%

Tableau 4.25. Sensibilité du coût de recyclage en 2030 dans P1/P2, par rapport à l'évolution des BLIs NMC.

4.3.4 Conclusions de l'analyse des procédés de recyclage

L'analyse des deux procédés par rapport au taux et revenus de recyclage montre qu'ils ne se distinguent pas. Ils permettent tous les deux de satisfaire le taux de recyclage réglementaire et de générer des revenus équivalents.

Concernant le coût de recyclage, P2 nécessite un coût plus important que celui dans P1, du fait de l'opération de pyrométallurgie. Ce coût de recyclage est sensible aux variables clés qui interviennent dans la dynamique de rentabilité du recyclage. Cependant, il se stabilise à partir de 2030 dans tous les scénarios. Nous rappelons tout de même que nous avons considéré une

durée de vie BLI moyenne (4.1.1.3), une durée de vite plus courte avance l'horizon de stabilisation (avant 2030). Inversement, une durée de vie plus longue retarde horizon de stabilisation (après 2030).

En prenant en compte les quatre analyses de sensibilité, le coût de recyclage pourra se stabiliser entre **-1 000 €/t** et **1 600 €/t**, comme le montre les deux graphiques suivants.

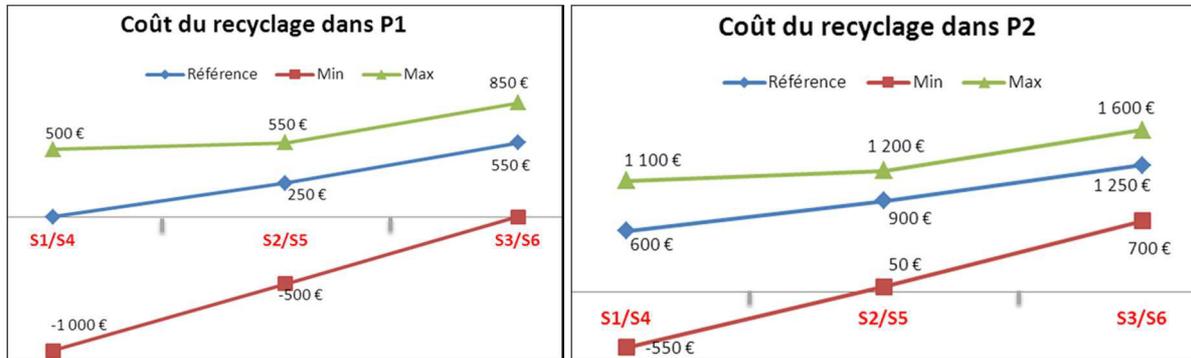


Figure 4.21. Valeurs possibles du coût de recyclage à terme dans les deux procédés.

Nous rappelons que ce coût ne comprend pas le coût de transport. Ce dernier varie entre 1000 €/t et 1500 €/t, en fonction des scénarios et des périodes (4.1.1.6). En l'incluant, le coût de recyclage **global** variera alors, entre **0 €/t** et **3 100 €/t**.

Nous déduisons que le recyclage constituera toujours un coût net de la fin de vie de la BLI, à la charge du constructeur.

4.4 Analyse du reconditionnement

Dans cette section, nous nous intéressons au reconditionnement. L'objectif de cette analyse étant de mesurer la rentabilité de cette option de valorisation et l'impact qu'elle aura sur le coût de la fin de vie de la BLI. Dans le modèle DS, nous analysons la dynamique : rentabilité du reconditionnement (le diagramme stock & flux est illustré en annexe B.4.2.7).

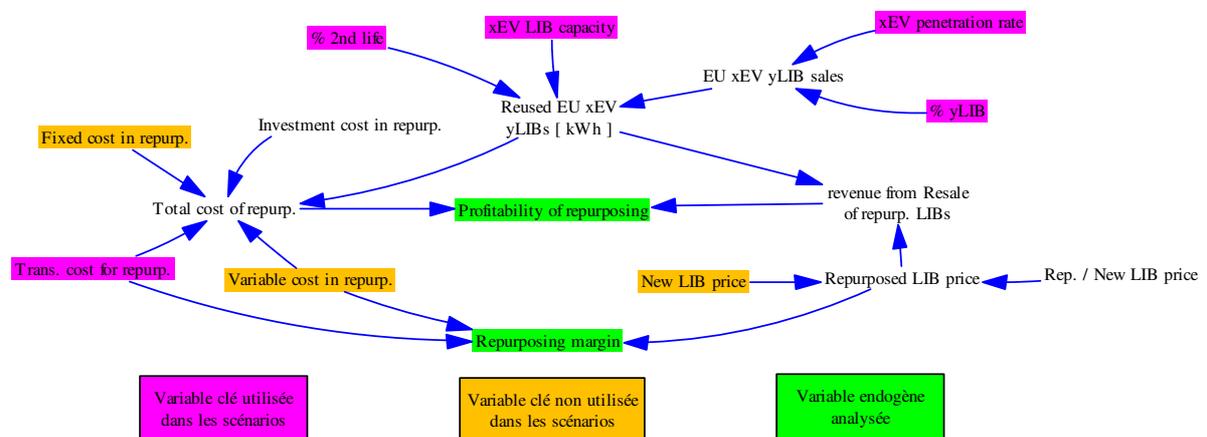


Figure 4.22. Diagramme simplifié des variables intervenant dans l'analyse du reconditionnement.

Ainsi, nous analysons la marge et les indicateurs de rentabilité du reconditionnement. Une analyse de sensibilité nous permettra de tenir compte des autres variables clés qui interviennent dans cette rentabilité (en orange sur la figure).

4.4.1 Rentabilité et marge du reconditionnement

Tout d'abord, nous rappelons les scénarios analysés. L'activité de reconditionnement existe uniquement dans les scénarios S1/S4 (80% du volume) et S2/S5 (20% du volume). Les hypothèses de coûts et bénéfices unitaires sont disponibles en annexe (B.4.1.7).

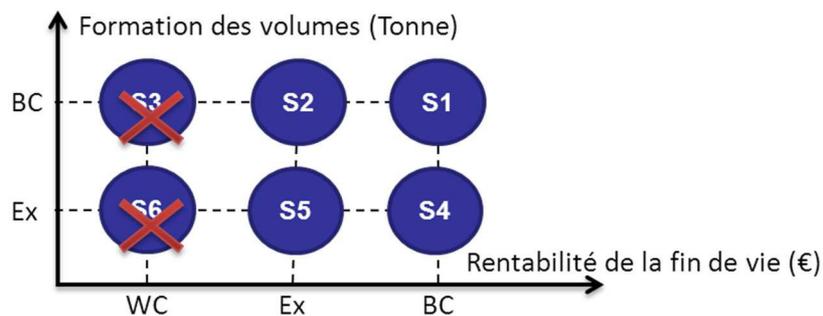


Figure 4.23. Rappel des quatre scénarios analysés.

La Figure 4.24 traduit l'évolution de la marge du reconditionnement. Cette dernière est calculée comme suit : $\text{Marge (€/kWh)} = \text{prix de vente BLI reconditionnée} - (\text{coût variable de reconditionnement} + \text{coût de transport})$.

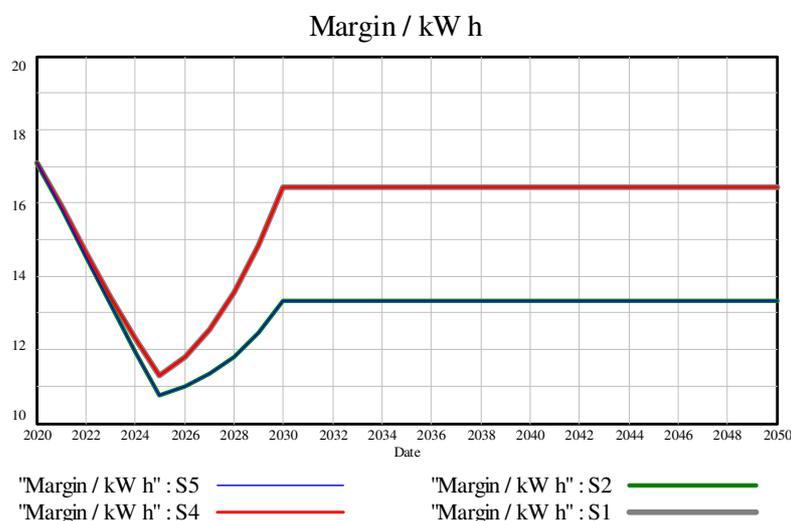


Figure 4.24. Evolution de la marge du reconditionnement dans les quatre scénarios.

La marge diminue entre 2020 et 2025 à cause de la baisse du prix des BLIs, même si le coût de transport baisse aussi. L'augmentation à partir de 2025 est due à la stabilisation du prix des BLIs, pendant que le coût de transport continue à diminuer jusqu'à 2030.

La figure ci-dessus traduit l'évolution du taux d'utilisation des unités de reconditionnement avec l'arrivée des volumes à traiter.

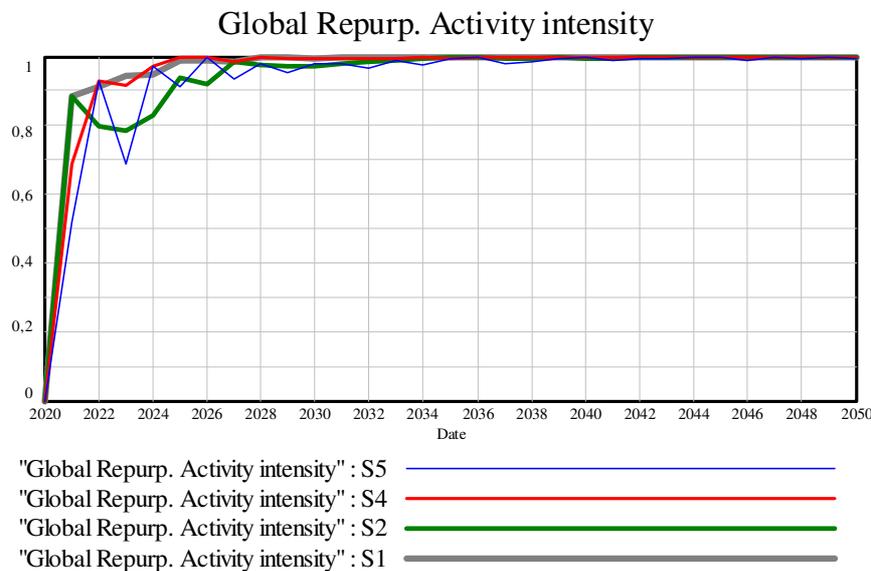


Figure 4.25. Taux d'utilisation des unités de reconditionnement dans les quatre scénarios.

A l'instar de la marge du reconditionnement, nous remarquons que le taux d'utilisation se stabilise à partir de 2030. Par conséquent, on peut s'attendre à la stabilisation des indicateurs de rentabilité à partir de cette date.

Pour les quatre scénarios, nous avons calculé les deux indicateurs de rentabilité suivants:

- **Point mort** : nombre d'années pour que la valeur actuelle nette devienne positive ;
- **Productivité du capital en 20 ans** : rapport entre la valeur actuelle nette au bout de 20 ans et l'investissement initial.

		2020	2025	2030
S1	marge € /kWh	17 €	11 €	16 €
	Point mort (années)	5	3	1
	Productivité du capital en 20 ans	5,4	8,2	10,4
S2	marge € /kWh	17 €	10 €	13 €
	Point mort (années)	7	4	2
	Productivité du capital en 20 ans	2,6	4,5	5,8
S4	marge € /kWh	17 €	11 €	16 €
	Point mort (années)	6	3	1
	Productivité du capital en 20 ans	5,0	8,1	10,4
S5	marge € /kWh	17 €	10 €	13 €
	Point mort (années)	10	4	2
	Productivité du capital en 20 ans	2,1	4,4	5,7

Tableau 4.26. Indicateurs de rentabilité du reconditionnement.

Nous remarquons une légère différence dans les paires S1/S4 et S2/S5 en 2020, puis les indicateurs deviennent pratiquement identiques à partir de 2025. A partir de 2025, le reconditionnement est très rentable dans tous les scénarios.

Même si le reconditionnement est rentable dans tous les scénarios et toutes les périodes, cette rentabilité est très sensible aux variables clés qui y interviennent (Tableau 4.2). Par conséquent, une analyse de sensibilité par rapport aux variables clés qui ne font pas partie des scénarios est nécessaire. C'est l'objet de la section suivante.

4.4.2 Analyse de sensibilité du reconditionnement

Dans cette section, nous analysons la sensibilité de la rentabilité du reconditionnement par rapport aux variables clés : coût variable de reconditionnement (*Variable cost in repurposing*), coût fixe de reconditionnement (*Fixed cost in repurposing*) et prix des BLIs (*New LIB price*). Nous rappelons que l'investissement initial ne fait pas partie de ces variables clés. Le but de cette analyse de sensibilité est de savoir dans quelles conditions le reconditionnement perd sa rentabilité.

4.4.2.1 Coût variable de reconditionnement

Nous avons analysé l'effet d'une augmentation de 25% et 50% du coût variable de reconditionnement. Les résultats sont récapitulés au tableau suivant.

		Référence			Coût variable + 25%			Coût variable + 50%		
		2020	2025	2030	2020	2025	2030	2020	2025	2030
S1	marge € /kWh	17,1 €	11,3 €	16,4 €	12,9 €	6,5 €	11,7 €	8,8 €	3,0 €	8,1 €
	Point mort	5	3	1	19	7	3			
	Productivité du capital en 20 ans	6,0	9,0	11,2	0,1	3,1	4,4	-4,5	-2,8	-0,6
S2	marge € /kWh	17,1 €	10,8 €	13,3 €	12,9 €	6,0 €	8,6 €			
	Point mort	7	4	2						
	Productivité du capital en 20 ans	3,2	5,3	6,6	-1,7	-0,5	-0,1			
S4	marge € /kWh	17,1 €	11,3 €	16,4 €	12,9 €	6,5 €	11,7 €	8,8 €	2,4 €	7,5 €
	Point mort	6	3	1		9	3			
	Productivité du capital en 20 ans	5,6	9,0	11,2	-0,1	2,2	4,4	-4,6	-2,9	-0,7
S5	marge € /kWh	17,1 €	10,8 €	13,3 €	12,9 €	6,0 €	8,6 €			
	Point mort	9	4	2						
	Productivité du capital en 20 ans	2,7	5,2	6,6	-2,1	-0,5	-0,2			

Tableau 4.27. Sensibilité de la rentabilité du reconditionnement par rapport au coût variable.

Une augmentation du coût variable de 25% induit une perte de la rentabilité en 2020 pour S1/S4 et sur toute la période pour S2/S5. Pour une augmentation de 50%, même le reconditionnement dans S1/S4 devient non rentable.

4.4.2.2 Coût fixe de reconditionnement

Nous avons analysé l'effet d'une augmentation de 25%, 50% et 100% du coût fixe de reconditionnement. Les résultats sont récapitulés au tableau suivant.

		Coût fixe + 25%			Coût fixe + 50%			Coût fixe + 100%		
		2020	2025	2030	2020	2025	2030	2020	2025	2030
S1	Point mort	11	5	2		13	2			
	Productivité du capital en 20 ans	2,6	5,3	7,6	-0,3	2,2	4,8	-5,3	-2,2	-0,9
S2	Point mort		9	4			15			
	Productivité du capital en 20 ans	-0,2	1,7	3,0	-2,4	-0,3	0,2			
S4	Point mort	11	5	2		8	2			
	Productivité du capital en 20 ans	2,2	5,3	7,5	-0,6	2,5	4,7	-5,6	-2,2	0,0
S5	Point mort		7	3			17			
	Productivité du capital en 20 ans	-0,1	2,4	3,8	-2,9	-0,4	0,1			

Tableau 4.28. Sensibilité de la rentabilité du reconditionnement par rapport au coût fixe.

Une augmentation de 25% du coût fixe induit une perte de la rentabilité en 2020 pour S2/S5. Une augmentation de 50% induit une perte de la rentabilité en 2020 pour S1/S4 et sur toute la période pour S2/S5. Pour une augmentation de 100%, même le reconditionnement dans S1/S4 devient non rentable.

4.4.2.3 Prix des BLIs

Dans les quatre scénarios analysés précédemment (Tableau 4.26), les prix BLIs utilisés sont rappelés à la première ligne du tableau ci-dessus. Dans cette section, nous analysons l'effet d'une diminution de ces prix, à savoir ceux de la deuxième et troisième ligne du tableau suivant.

	2015	2020	2025	2030
Référence €/kWh	250	175	150	150
(Hein et al., 2012) €/kWh	250	170	140	140
(Lux Research, 2015) pour Tesla €/kWh	250	150	130	130

Tableau 4.29. Prix des BLIs utilisés dans l'analyse de sensibilité.

Les résultats sont récapitulés au tableau suivant.

		Prix BLI (Hein et al., 2012)			Prix BLI (Lux Research, 2015) pour Tesla		
		2020	2025	2030	2020	2025	2030
S1	marge €/kWh	15,6 €	7,7 €	12,8 €	9,6 €	4,3 €	9,8 €
	Point mort (années)	12	6	2			5
	Productivité du capital en 20 ans	1,9	3,9	6,1	-2,5	-0,4	1,8
S2	marge €/kWh	15,6 €	7,2 €	9,7 €	9,6 €	4,2 €	6,7 €
	Point mort (années)		16	6			
	Productivité du capital en 20 ans	-0,7	0,3	1,5	-4,8	-3,9	-2,7
S4	marge €/kWh	15,6 €	7,7 €	12,8 €	9,6 €	4,3 €	9,8 €
	Point mort (années)	13	6	2			5
	Productivité du capital en 20 ans	1,6	3,9	6,1	-2,7	-0,4	1,8
S5	marge €/kWh	15,6 €	7,2 €	9,7 €	9,6 €	4,2 €	6,7 €
	Point mort (années)		17	6			
	Productivité du capital en 20 ans	-1,1	0,2	1,5	-5,1	-3,9	-2,8

Tableau 4.30. Sensibilité de la rentabilité du reconditionnement par rapport au prix des BLIs.

Le prix BLIs issu de (Hein et al., 2012) induit une perte de la rentabilité en 2020 et 2025 pour S2/S5. Le prix BLIs issu de (Lux Research, 2015) induit une perte de la rentabilité en 2020 et 2025 pour S1/S4 et sur toute la période pour S2/S5.

4.4.3 Conclusions sur l'analyse du reconditionnement

A travers l'analyse de sensibilité, nous pouvons identifier des seuils de perte de rentabilité pour les variables clés, que nous récapitulons au tableau suivant :

	S1/S4			S2/S5		
	2020	2025	2030	2020	2025	2030
Coût var. de recond.	> + 25%	> 50%	> 50%	> + 25%	> + 25%	> + 25%
Coût fixe de recond.	> + 50%	> + 100%	> + 100%	> + 25%	> + 50%	> + 50%
Prix des BLIs	< (Lux Research, 2015)	< (Lux Research, 2015)	< /	< (Hein et al., 2012)	< (Hein et al., 2012)	< (Lux Research, 2015)

Tableau 4.31. Seuils de la perte de rentabilité du reconditionnement.

Lorsque le reconditionnement est rentable, nous obtenons une valeur de la marge à terme comprise entre 9,7 €/kWh et 15,8 €/kWh, comme le montre la Figure 4.26.

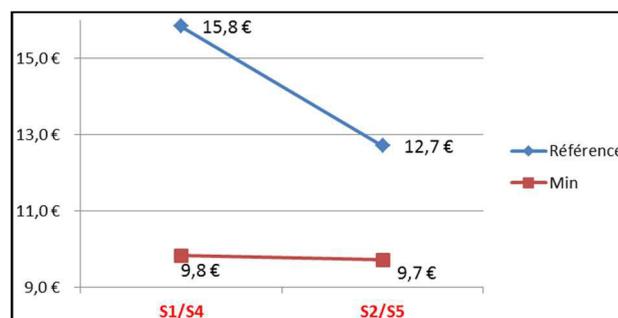


Figure 4.26. Valeurs possibles de la marge de reconditionnement à terme.

Le reconditionnement ayant toujours un effet positif sur le coût de la fin de vie, nous allons analyser à la section suivante, dans quelle mesure il pourra compenser le coût de recyclage.

4.5 Analyse du coût de la fin de vie

En considérant le coût du recyclage dans les deux procédés et la marge du reconditionnement, nous avons calculé le coût de la fin de vie dans les six scénarios. A l'instar du recyclage, nous distinguons le **coût de la fin de vie** (coût du recyclage – marge de reconditionnement) et le **coût de la fin de vie global** (coût du recyclage **global** – marge de reconditionnement). Ces coûts peuvent être positifs (coût net à la charge du constructeur) ou négatifs (profit pour le constructeur).



Figure 4.27. Calcul du coût de la fin de vie (global).

Nous avons calculé ces coûts avec les valeurs référence (Tableau 4.32), dans un premier temps. Puis avec les intervalles de variations issus des analyses de sensibilités (Figure 4.28). Les marges de la 2^{nde} vie exprimées en tonnes sont calculées en multipliant celles du Tableau 4.26 par 80 (12,5 kg / kWh, B.4.1.3.4), puis en arrondissant vers un multiple de 5.

		Procédé : P1			Procédé : P2		
Option		2020	2025	2030	2020	2025	2030
S1	Coût recyclage	1 500 €	150 €	- €	4 000 €	900 €	600 €
	Marge 2 ^{nde} vie	1 370 €	855 €	1 270 €	1 370 €	855 €	1 270 €
	Fin de vie	130 €	-705 €	-1 270 €	2 630 €	45 €	-670 €
S2	Coût recyclage	700 €	250 €	250 €	2 200 €	900 €	900 €
	Marge 2 ^{nde} vie	1 370 €	815 €	1 020 €	1 370 €	815 €	1 020 €
	Fin de vie	-670 €	-565 €	-770 €	830 €	85 €	-120 €
S3	Coût recyclage	700 €	300 €	550 €	2 000 €	1 000 €	1 250 €
	Marge 2 ^{nde} vie						
	Fin de vie	700 €	300 €	550 €	2 000 €	1 000 €	1 250 €
S4	Coût recyclage	2 500 €	300 €	- €	5 500 €	1 200 €	600 €
	Marge 2 ^{nde} vie	1 370 €	855 €	1 270 €	1 370 €	855 €	1 270 €
	Fin de vie	1 130 €	-555 €	-1 270 €	4 130 €	345 €	-670 €
S5	Coût recyclage	1 150 €	250 €	250 €	3 000 €	900 €	900 €
	Marge 2 ^{nde} vie	1 370 €	815 €	1 020 €	1 370 €	815 €	1 020 €
	Fin de vie	-220 €	-565 €	-770 €	1 630 €	85 €	-120 €
S6	Coût recyclage	1 000 €	300 €	550 €	2 700 €	1 000 €	1 250 €
	Marge 2 ^{nde} vie						
	Fin de vie	1 000 €	300 €	550 €	2 700 €	1 000 €	1 250 €

Tableau 4.32. Coûts des options de valorisation et de la fin de vie (hors transport pour recyclage).

A terme, dans tous les cas, la marge du reconditionnement est plus importante que le coût de recyclage, **cela implique un effet considérable sur la fin de vie. A terme et hors coût de transport pour le recyclage, la fin de vie de la BLI constitue un profit dans les scénarios S1/ S4 et S2/S5.**

En prenant en compte les intervalles des valeurs possibles du coût de recyclage (Figure 4.21) et de la marge du reconditionnement (Figure 4.26), nous obtenons les intervalles suivants pour le coût de la fin de vie à terme de la BLI.

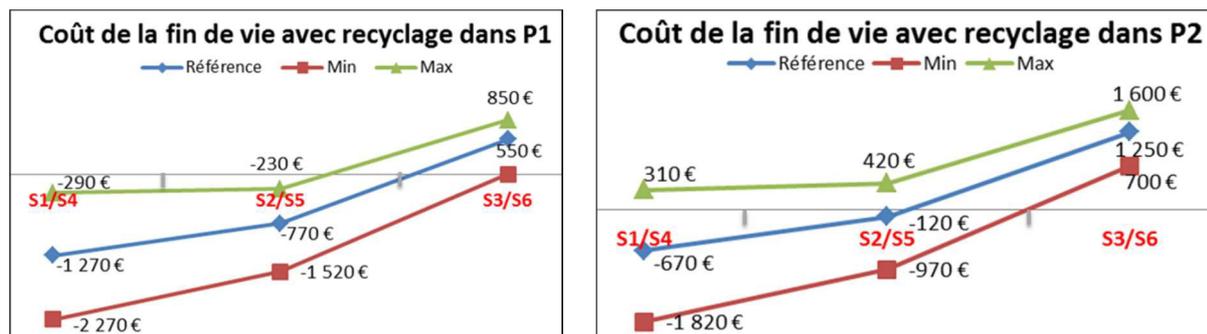


Figure 4.28. Valeurs possibles du coût de la fin de vie à terme dans les deux procédés.

Nous constatons que dans P1, la fin de vie constitue toujours un profit dans les scénarios S1/S4 et S2/S5, ce qui n'est pas tout le temps vrai dans P2. S3/S6 reste un coût net dans toutes les situations. Si on inclut le coût de transport pour recyclage, qui est de 1000 €/t dans S1/S4, 1250 €/t dans S2/S5 1500 €/t dans S3/S6, nous obtenons les intervalles suivants pour le coût de la fin de vie global à terme.

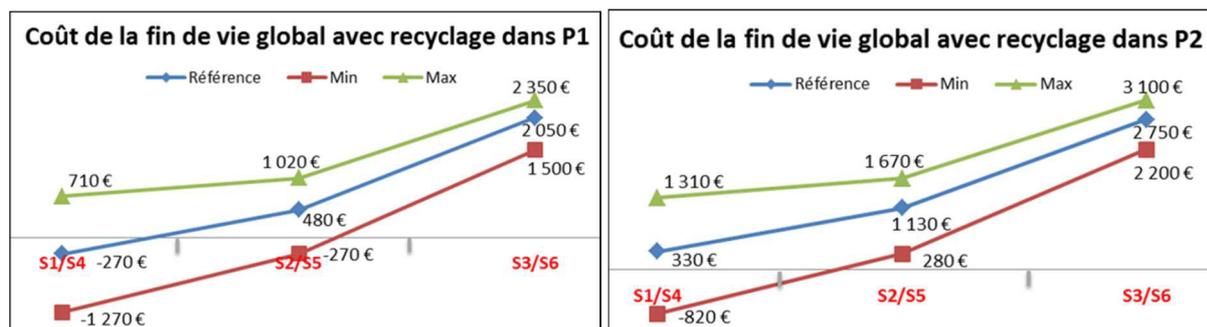


Figure 4.29. Valeurs possibles du coût de la fin de vie global à terme.

En comparant les deux figures ci-dessus, **on déduit l'importance d'optimiser le coût de transport.** Ce dernier augmente considérablement le coût de la fin de vie de la BLI.

Après avoir analysé le coût de la fin de vie de la BLI, nous terminons par celui du **cycle de vie global de la BLI.** Ce dernier inclut le prix initial et le coût de la fin de vie global de la BLI

(Figure 4.30). Nous nous y intéressons afin de savoir dans quelle mesure, la valorisation (recyclage/reconditionnement) permet de l'abaisser ou de l'augmenter.



Figure 4.30. Les composantes du coût du cycle de vie global de la BLI.

Pour ce faire, nous analysons d'abord l'effet du 'coût de recyclage global' et de la 'marge du reconditionnement' séparément, puis ensemble à travers le 'coût de fin de vie global'. Nous rappelons les intervalles des valeurs possibles de ces trois éléments à terme.

	Coût de recyclage global	Marge du reconditionnement	Coût de fin de vie global
Min	0 €/t	- 15,8 €/kWh	- 1 270 €/t
Max	3 100 €/t	- 9,7 €/kWh	3 100 €/t

Tableau 4.33. Intervalle des coûts constituant la fin de vie à terme.

Afin d'harmoniser ces coûts et de les rapporter à une BLI, nous considérons une BLI moyenne avec un poids de **250 kg** et une capacité de **20 kWh** (B.4.1.3.4). Concernant le prix initial de la BLI à terme, nous considérons un prix moyen de 150 €/kWh (B.4.1.7.3). Par conséquent, nous obtenons les coûts équivalents suivants pour le recyclage (Tableau 4.34). L'effet sur le coût du cycle de vie global de la BLI est calculé à la dernière colonne.

	€/t	€/BLI	€/kWh	% prix BLI
Min	0 €	0 €	0 €	0%
Max	3 100 €	775 €	38,8 €	26%

Tableau 4.34. Intervalle du coût de recyclage global à terme.

A terme, le recyclage sera neutre dans le coût du cycle de vie global de la BLI (0 €/kWh) dans le meilleur des cas. Dans le pire des cas, il l'augmentera de 26% (39 €/kWh).

Passons maintenant au reconditionnement. En considérant toujours une BLI moyenne de 250 kg et 20 kWh, un prix BLI à terme de 150 €/kWh, nous obtenons les marges équivalentes suivantes. Nous avons reporté les marges avec un signe négatif pour signifier l'effet de réduction dans le coût du cycle de vie global de la BLI.

	€/t	€/BLI	€/kWh	% prix BLI
Min	- 1 264 €	- 316 €	- 15,8 €	- 11%
Max	- 776 €	- 194 €	- 9,7 €	- 6%

Tableau 4.35. Intervalle de la marge de reconditionnement à terme.

A terme, lorsque le reconditionnement se développe, le coût du cycle de vie global de la BLI pourra être réduit de 11% dans le meilleur des cas. Dans le pire des cas, il le sera juste de 6%.

Enfin, nous analysons l'effet de la valorisation (recyclage et reconditionnement) sur le coût du cycle de vie global de la BLI, à travers le coût de la fin de vie global de la BLI. En considérant toujours une BLI moyenne de 250 kg et 20 kWh, un prix BLI à terme de 150 €/kWh, nous obtenons les coûts équivalents suivants:

	€/t	€/BLI	€/kWh	% prix BLI
Min	- 1 270 €	- 318 €	- 15,8 €	- 11%
Max	3 100 €	775 €	38,8 €	26%

Tableau 4.36. Intervalle du coût de la fin de vie global à terme.

A terme, dans le meilleur des cas où le reconditionnement se développe et le coût de recyclage global est nul, le coût du cycle de vie global de la BLI pourra être réduit de 11%. Dans le pire des cas correspondant à un reconditionnement nul et un coût de recyclage global de 3 100 €/t, le coût du cycle de vie global de la BLI pourra être augmenté de 26%.

4.6 Conclusions du chapitre 4

Dans ce quatrième chapitre, nous avons mené quatre analyses nous permettant d'étudier la filière de valorisation d'un point de vue technico-économique et prospectif. Ces analyses ont été faites grâce aux éléments de modélisation établis au chapitre précédent, à savoir le modèle DS et les variables clés pour la construction des scénarios.

Ces quatre analyses nous ont apportés des éléments de réponse aux motivations pour la valorisation des BLIs (géostratégiques, réglementaires, économiques), le tout en considérant plusieurs technologies BLI et de valorisation.

- ✓ **L'analyse de la criticité géologique des matières** nous permet de conclure que l'utilisation des BLIs pour le développement de l'électromobilité en Europe, n'engendre pas une tension sur la consommation des réserves, à l'exception du cobalt. Toutefois, certaines matières (Ni, Mn, Cu et Fe) présentent un risque d'épuisement des réserves du fait de la demande dans les autres secteurs industriels. D'où la nécessité de bien modéliser cette demande et de déployer des stratégies de mitigation.

- ✓ **Dans l'analyse des deux procédés de recyclage**, le coût de recyclage est le seul élément discriminant entre les deux procédés. Il est plus important dans le procédé pyrométallurgique. A l'horizon 2030, le recyclage pourra générer de la valeur pour les constructeurs dans certaines conditions. Cependant, en ajoutant le coût de transport, on arrive juste à l'équilibre dans les meilleurs des cas. D'où la nécessité de bien modéliser ce dernier afin de l'optimiser.
- ✓ **L'analyse du reconditionnement** nous a permis d'identifier dans quelles conditions cette option de valorisation sera rentable. A terme, le reconditionnement pourra générer entre 9,7 €/kWh et 15,8 €/kWh. Cela permettra d'abaisser considérablement le coût de la fin de vie de la BLI.
- ✓ **Enfin, dans l'analyse du coût de la fin de vie**, nous avons considéré les deux options de valorisation. Nous avons calculé et reporté le coût de la fin de vie global de la BLI à terme sur son prix initial, comme le montre la figure suivante.

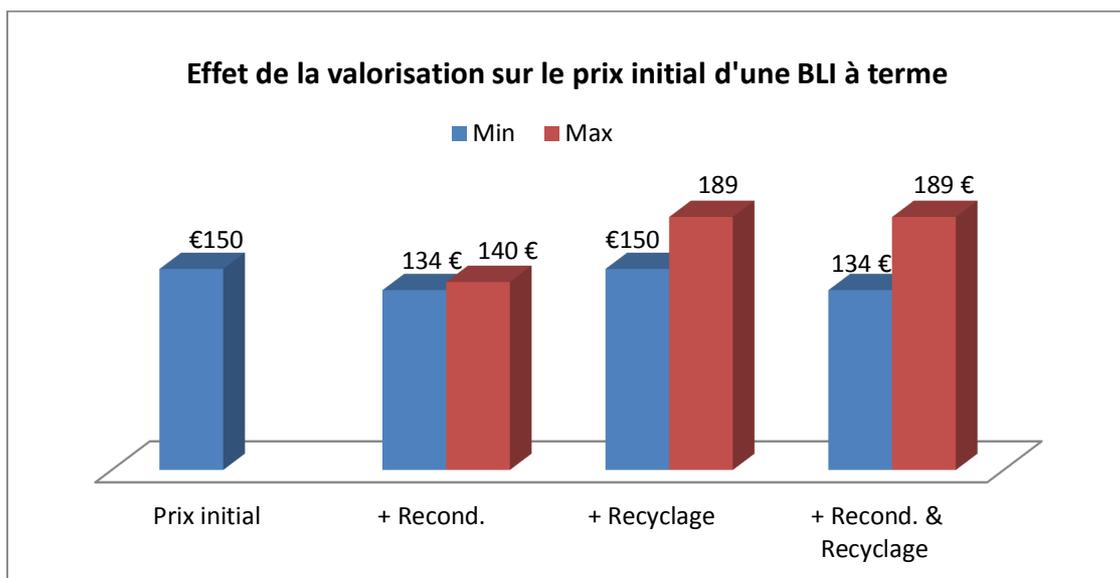


Figure 4.31. Evolution du prix d'une BLI à terme (€/kWh), avec sa valorisation.

Il est possible que la valorisation ne puisse pas abaisser le coût initial d'une BLI, par conséquent le coût de possession d'un VE. S'il était possible de réduire ce coût initial, c'est le reconditionnement qui y contribuerait, même si cette réduction est mesurée (11% au mieux).

Après avoir étudié la filière de valorisation des BLIs d'un point de vue technico-économique et prospectif, nous passons à son étude d'un point de vue organisationnel. C'est l'objet du chapitre suivant.

Chapitre 5 : Analyse de la gouvernance de la filière

Ce cinquième chapitre a pour but de traiter la troisième question de recherche : **Comment analyser la gouvernance de la filière de valorisation des BLIs ?** Il représente l'un des piliers de la représentation de notre approche (Figure 5.1). En effet, cette troisième question de recherche va s'appuyer sur les éléments de modélisation de la filière afin de l'étudier d'un point de vue organisationnel.

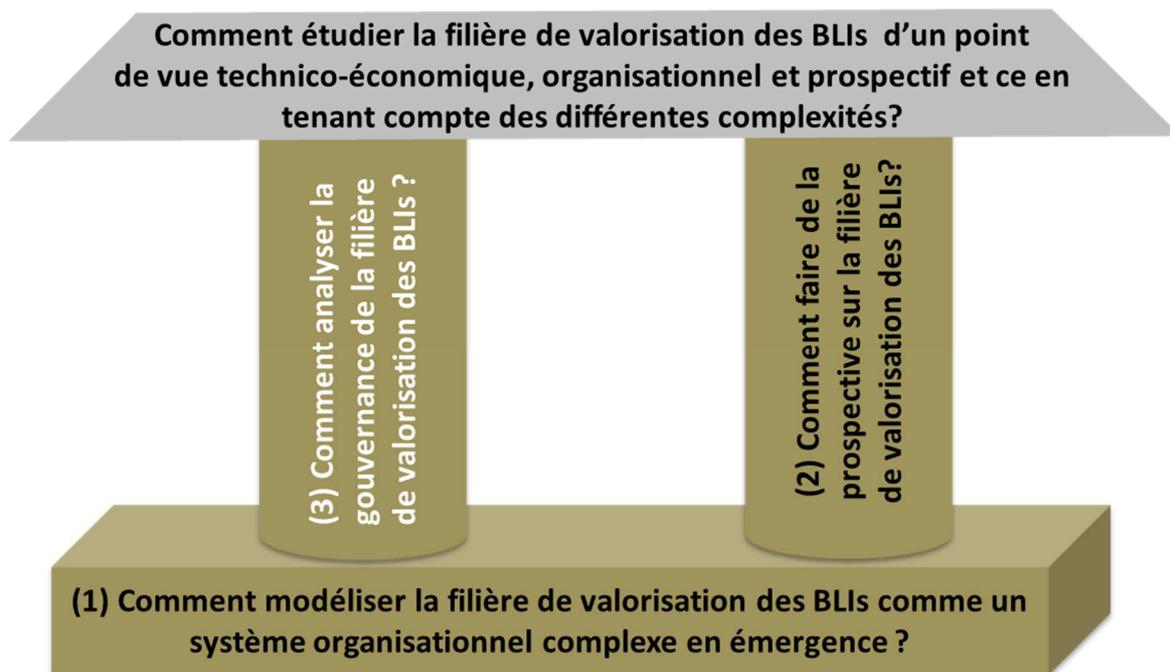


Figure 5.1. **Articulation des trois questions de recherche** pour répondre à la problématique.

Dans la première section de ce chapitre, nous allons clarifier ce qui va constituer l'analyse de la gouvernance de la filière. Dans un premier temps, nous précisons la notion de gouvernance que nous adopterons dans notre travail de recherche, puis le périmètre de cette analyse sur les activités de la filière.

Dans la seconde section de ce chapitre, nous allons construire et exposer notre démarche pour mener l'analyse de la gouvernance. La mise en œuvre de cette démarche aboutit à l'élaboration d'une méthodologie d'aide à la décision. Nous allons fournir un exemple d'utilisation et récapituler la logique de fonctionnement de la méthodologie en fin de cette seconde section.

5.1 Précision du périmètre d'analyse de la gouvernance de la filière

La gouvernance est une notion parfois mal définie, car pouvant être utilisée dans plusieurs cadres (gouvernance politique, gouvernance d'entreprise, gouvernance d'un marché et autres). Toutefois, nous pouvons recenser des éléments communs aux divers usages et définitions : le pilotage, la multiplicité d'acteurs et de lieux géographiques, la prise de décision décentralisée dans un cadre commun.

Dans le monde de l'entreprise, la gouvernance peut traduire l'ensemble des règles qui cadrent la direction, contrôle et administration d'une entreprise (Boutillier et al., 2002). Selon Y. Allaire, président exécutif de l'Institut sur la gouvernance d'organisations privées et publiques (IGOPP) : « *La gouvernance consiste à mettre en œuvre tous les moyens pour qu'un organisme puisse réaliser les fins pour lesquelles il a été créé... La gouvernance est donc faite de règles d'imputabilité et de principes de fonctionnement mis en place par le conseil d'administration ...* ». Par ailleurs, cette définition s'applique aux entreprises existantes, pour qui les éléments internes à gouverner, sont bien définis. Or, nous sommes en prospective pour l'aide à la conception de la filière de valorisation des BLIs, pour laquelle les éléments internes restent à définir. Par conséquent, nous ne retiendrons pas cette définition.

La gouvernance d'une entreprise (ou structure de gouvernance) peut également faire référence à ce qui constitue **la frontière d'une firme** et sa manière d'interagir avec ses partenaires (relation de marché, partenariat ou intégration verticale), à l'image du corpus de littérature sur l'économie institutionnelle, comme la théorie des coûts de transactions (Coase, 1937; Williamson, 2000).

Dans notre travail de recherche, nous limitons la gouvernance au sens de la frontière d'une entreprise (firme), à savoir son niveau d'intégration d'activités en amont/aval. Ainsi, nous ne considérons pas les aspects de pilotage de ressources humaines, de relations contractuelles, etc., auxquels la notion de gouvernance pourrait renvoyer.

Pour la filière de valorisation des BLIs, la gouvernance traduit la **typologie d'organisation** de ses différentes **parties prenantes** autour de ses différentes **activités**.

En d'autres termes, **analyser la gouvernance de la filière en phase prospective, revient à identifier, analyser et hiérarchiser des combinaisons de répartition (activité, partie prenante).**

La modélisation systémique, nous a permis d’identifier les parties prenantes et sous-systèmes de la filière (3.2.1). En considérant les sous-systèmes en termes d’activités, nous obtenons les activités : « **Collecte** », « **Inspection/Tri** », « **Transport pour recyclage** », « **Recyclage** ». « **Transport pour reconditionnement** » et « **Reconditionnement** ».

En ce qui concerne les parties prenantes, nous avons distingué celles qui constituent l’environnement dans lequel la filière s’insère et celles pour lesquelles la filière génère une valeur ajoutée (voir 3.2.1.4 pour la liste complète). Certaines de ces parties prenantes ne sont pas susceptibles d’entreprendre l’une des activités ci-dessus (Législateur, Exportateur de déchets, Fournisseur VHU, etc.). Après leurs éliminations, nous retenons les parties prenantes suivantes dans ce chapitre : « **Constructeur automobile** », « **Fabricant de batteries** », « **Logisticien** », « **Recycleur** », « **Utilisateur 2^{nde} vie** » et « **Reconditionneur** ». **Nous allons détailler par la suite les types d’utilisateurs 2^{nde} vie et expliciter le rôle du « reconditionneur » nouvel acteur dans notre cartographie.**

Ainsi, il existe une combinatoire conséquente pour la répartition de ces activités parmi les parties prenantes. Le Tableau 5.1 illustre le champ des possibilités. Dans l’absolu, il existerait 46 656 (6⁶) typologies d’organisations possibles.

	Constructeur automobile	Fabricant de batteries	Logisticien	Recycleur	Utilisateur 2 ^{nde} vie	Reconditionneur
Collecte	X		Y			
Inspection / Tri	X		Y			
Transport pour recyclage			Y	X		
Recyclage	Y			X		
Transport pour reconditionnement		X	Y			
Reconditionnement pour 2 ^{nde} vie	Y	X				

Tableau 5.1. Tableau des combinaisons possibles activités /parties prenantes. (X) exemple de la Figure 5.2.

Les deux typologies d’organisation X et Y reportées dans ce tableau sont deux possibilités parmi d’autres. La typologie (X) est illustrée dans la figure suivante (Figure 5.2).

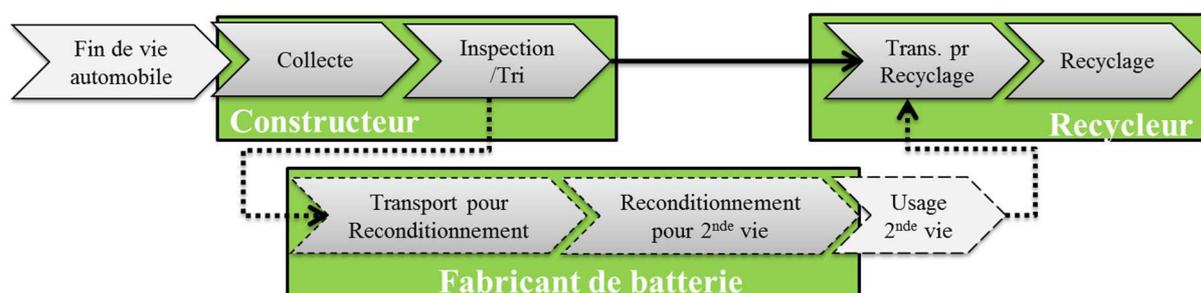


Figure 5.2. Exemple d’une typologie d’organisation.

L'analyse de la gouvernance suppose de considérer les activités (Collecte, Inspection/Tri, Transport pour recyclage/ reconditionnement, Recyclage et Reconditionnement) et les parties prenantes retenues (Constructeur automobile, Fabricant de batteries, Logisticien, Recycleur, Utilisateur 2nde vie et Reconditionneur). Dans les paragraphes suivants, nous allons dresser le contexte de ces différentes activités.

L'activité d'inspection et de tri est intimement liée à l'activité de recyclage et de reconditionnement. En l'absence du reconditionnement, elle peut être entreprise par l'une des parties prenantes : constructeur ou recycleur, qui appartiennent au circuit de valorisation obligatoire (réglementation). Si l'activité de reconditionnement existe avec l'activité de recyclage, l'inspection et le tri pourront être intégrés à l'une ou l'autre de ces deux activités. Par conséquent, nous prenons l'hypothèse suivante :

Hypothèse (5.1): L'activité d'inspection/tri sera entreprise par l'une des parties prenantes : « Constructeur », « Recycleur » ou « Reconditionneur ».

En ce qui concerne **l'acteur logisticien et les activités de transport associées**, nous prenons l'hypothèse suivante :

Hypothèse (5.2): Les activités: collecte, transport pour reconditionnement et pour recyclage ainsi que la partie prenante logisticien sont soustraites de l'analyse.

Cette hypothèse est justifiée par le fait que le transport des BLIs est soumis à la réglementation ADR (Accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par route) et qu'il nécessite donc une compétence particulière du logisticien. De plus le transport de déchets est également une activité de spécialistes. Les transporteurs de déchets dangereux existent déjà, ils ajouteront donc probablement ces produits à transporter à leurs activités. Au final, la contractualisation de la logistique pourra être réalisée par différents donneurs d'ordre (constructeur, fabricant de batterie, utilisateur 2nde ou un reconditionneur). Ainsi, l'impact du transport est secondaire sur l'organisation de la filière.

L'activité de **recyclage** est obligatoire du fait de la réglementation. Nous l'avons vu au chapitre précédent, le revenu de revente des matières recyclées ne permettra pas de générer une valeur positive (4.3.4). **Aujourd'hui il existe des recycleurs déployant des procédés industriels ou semi-industriels.** Ces recycleurs ont des **profils** différents : sociétés minières (Umicore, Eramet), gestionnaires de déchets (EDI) ou des spécialistes du recyclage des piles

et accumulateurs (SNAM, Recupyl). Le recyclage des BLIs est perçu comme une opportunité de diversification des approvisionnements. Cependant, il comporte des difficultés techniques supplémentaires (taille, composition et dangerosité des BLIs). Ce qui nécessite des adaptations des procédés de recyclage existants.

Actuellement, la tendance est au partenariat moyen terme (2-5 ans) entre ces sociétés de recyclage et les constructeurs, qui sont soumis à la Responsabilité Elargie du Producteur (REP). Dans l'avenir, la concurrence entre ces recycleurs aboutira probablement à l'émergence de certains profils et à la disparition d'autres, peut-être aussi à des situations de monopole. Toutefois, l'activité de recyclage sera toujours entreprise par ces acteurs cités ci-dessus, du fait de la compétence technologique nécessaire, des investissements déjà entrepris et de l'opportunité de mutualiser les volumes provenant de plusieurs constructeurs afin d'abaisser le coût de recyclage, surtout dans les premières années (4.3.3). Pour la suite de notre travail, nous prenons l'hypothèse suivante :

Hypothèse (5.3) : L'activité de recyclage est affectée à la partie prenante : « Recycleur ».

A l'inverse, l'activité de **reconditionnement n'existe pas aujourd'hui**. Il n'y a pas d'impératifs réglementaires quant à sa mise en place. Il s'agit plutôt d'une opportunité de création d'une nouvelle activité, reste à démontrer sa faisabilité technico-économique, à laquelle nous avons répondu au chapitre précédent (4.4.1). Une fois la faisabilité technico-économique démontrée, il faut s'assurer qu'il y ait des acteurs industriels motivés et aptes à concrétiser cette nouvelle activité. C'est ce qui est investigué dans le présent chapitre.

Parmi les parties prenantes potentielles, plusieurs pourraient entreprendre cette activité. Les constructeurs sont responsables de la fin de vie de la batterie, ce qui les met au premier plan pour capter la valeur résiduelle de ces dernières et baisser le coût global d'une batterie (4.4.3). Les fabricants des batteries pourraient voir une compétition entre les batteries reconditionnées et les batteries neuves. C'est également le cas des recycleurs, pour qui les volumes divergés pour la réutilisation, rentrent en compétition avec les volumes à recycler. Enfin, on peut considérer d'autres parties prenantes comme les utilisateurs 2nde vie (énergéticiens par exemple) ou de nouveaux acteurs qui vont se spécialiser dans cette activité (reconditionneur).

Au final, **nous sommes passés de 46 656 à 15 typologies d'organisation possibles** (Tableau 5.2), ce nombre a été obtenu en réduisant le nombre des combinaisons (activité, partie prenante), considérant les trois hypothèses récapitulées ci-dessous :

- L'affectation de l'activité inspection/tri aux parties prenantes : constructeur, recycleur et reconditionneur.
- L'élimination des activités : collecte, transport pour reconditionnement et pour recyclage ainsi que la partie prenante logisticien ;
- L'affectation de l'activité recyclage à la partie prenante recycleur ;

	Constructeur automobile	Fabricant de batteries	Recycleur	Utilisateur 2 ^{nde} vie	Reconditionneur
Inspection / Tri	?		?		?
Reconditionnement pour 2 ^{nde} vie	?	?	?	?	?
Recyclage			X		

Tableau 5.2. Combinaisons retenues pour la répartition des activités parmi les parties prenantes.

L'activité de reconditionnement pourra potentiellement faire intervenir toutes les parties prenantes précitées, à l'inverse des autres activités. Sa concrétisation impacte l'ensemble de la filière, de par la mise en place d'autres activités (inspection/tri, transport pour reconditionnement) et la compétition entre les volumes reconditionnés et recyclés.

Le reconditionnement est l'activité qui présente le moins de maturité technologique, mais qui risque de prendre une importance non négligeable dans l'avenir que ce soit d'un point de vue économique que défi technologique. C'est aussi l'activité qui pose le plus de questions sur la gouvernance de la filière (quelles conditions pour son émergence, pour quelles applications 2^{nde} vie, quelles conséquences sur la filière, quelles parties prenantes pour l'entreprendre, etc.).

Etant dans un contexte industriel, pour qui l'intérêt est l'aide au choix de positionnements stratégiques futurs, **nous avons limité l'étude de la gouvernance à l'activité de reconditionnement. Nous nous focaliserons donc sur la question du positionnement des différentes parties prenantes pour l'organisation de cette activité de reconditionnement.** La troisième question de recherche est reformulée comme suit : **Comment analyser la gouvernance de la filière de valorisation des BLIs sur le périmètre de l'activité de reconditionnement ?**

Après avoir précisé le périmètre de l'analyse de la gouvernance en termes de concept, d'activités et de parties prenantes, nous allons présenter notre démarche pour cette étude dans la section suivante.

5.2 Organisation de la filière sur le périmètre de l'activité de reconditionnement

L'activité de reconditionnement étant particulièrement émergente, nous ne disposons pas d'éléments quantitatifs pour le développement d'un modèle d'analyse élaboré. Etant dans un contexte industriel, pour qui l'intérêt est l'aide au choix de positionnements stratégiques futurs, nous avons contribué à l'élaboration d'une **méthodologie d'aide à la décision**. Une méthodologie que nous allons progressivement construire dans cette section. La section 5.2.5 récapitule sa logique.

Pour la construction de ce cette méthodologie d'aide à la décision, nous avons adopté une démarche inspirée des travaux (El korch, 2010; Tchertchian, 2013), qui se sont déroulés dans le cadre du projet MacPMR (Méthode d'Aide à la Conception de Produits Mécatroniques Remanufacturables)²⁰. Ce dernier a pour but de développer une méthode d'aide à la conception des **systèmes de remanufacturing** qui intègrent : des scénarios d'usage, des architectures produits et des **structures de la filière de remanufacturing**. Ce dernier élément fait référence aux typologies d'organisation, c'est ce qui nous intéresse dans notre travail de recherche. La méthode de conception MacPMR est structurée en six étapes (Figure 5.3).

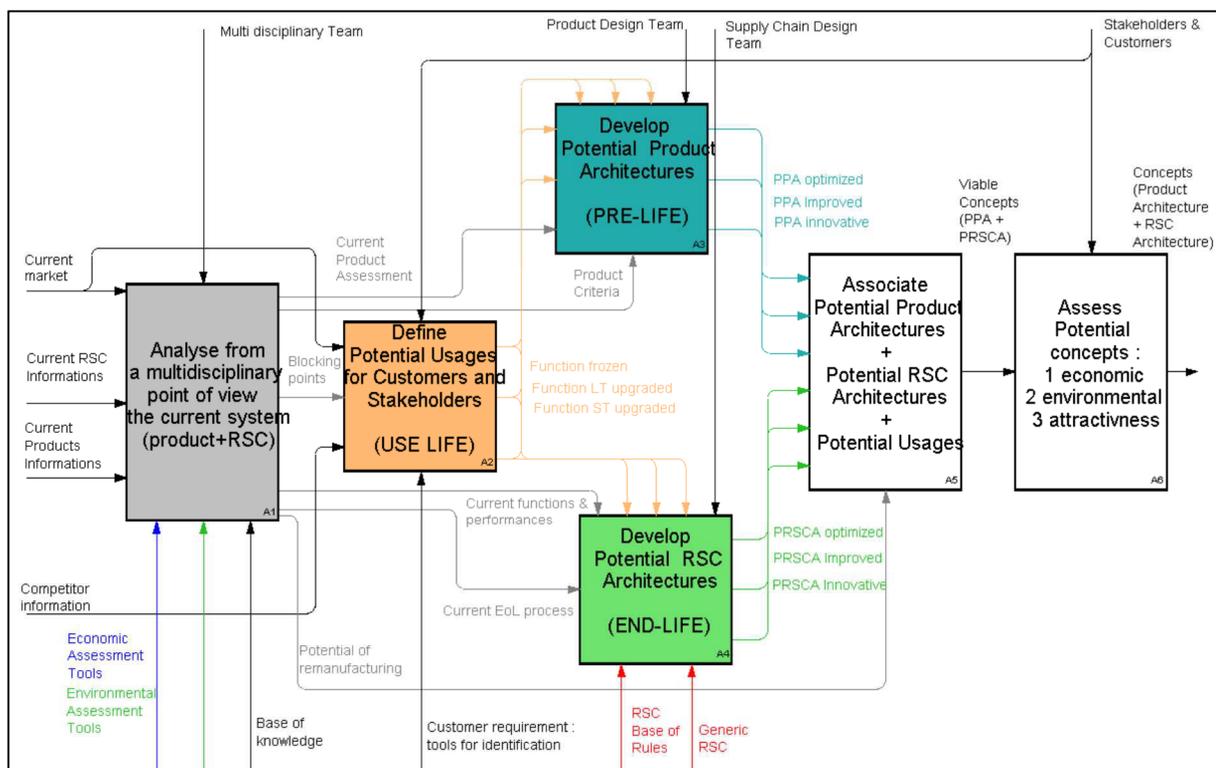


Figure 5.3. Cadre de la méthode aidant à définir les systèmes éco-innovants. (El korch, 2010; Tchertchian et al., 2010)

²⁰ « MacPMR » est un projet cofinancé par la Fondation CETIM et l'ADEME.

Les première, deuxième et troisième étapes aboutissent au développement d'une **liste d'architectures produits potentielles** en vue du remanufacturing. En ce qui concerne notre travail, nous ne sommes pas dans le cadre de l'éco-innovation du produit « batterie ». Notre travail intervient uniquement sur le périmètre de la fin de vie de la batterie. Par conséquent, les trois premières étapes de la méthode MacPMR ne sont pas applicables dans ce travail.

Par ailleurs, nous avons besoin de disposer d'informations concernant les applications 2nde vie, qui comme nous allons le voir ci-dessous (5.2.1), sont hétérogènes et ne peuvent pas être considérées d'une manière générique. Ainsi, nous proposons de réaliser **un état de l'art sur les applications 2nde vie** afin d'identifier **les applications potentielles**. Dans cet état de l'art, nous allons aussi identifier des **critères de 'caractérisation'** des applications 2nde vie.

Les trois dernières étapes de MacPMR (4,5, 6) ont été développées et réorganisées dans une approche systémique et processuelle, décrite dans (El korchi, 2010; El korchi and Millet, 2011). Cette réorganisation a abouti à une approche en deux nouvelles étapes :

- Identification de la structure de la filière de remanufacturing actuelle, si elle existe ;
- Choix des structures 'génériques' potentielles de la filière de remanufacturing, à travers une évaluation de faisabilité, puis une évaluation quantitative multicritères (environnementale, économique et sociale), ce qui permet une hiérarchisation des structures potentielles.

Les auteurs ont identifié 18 structures génériques à évaluer. Dans notre travail, nous ne nous limitons pas au cas où le concepteur et fabricant du produit, soit aussi l'acteur du reconditionnement, les structures génériques font référence aux cinq types de parties prenantes retenues. Concernant l'évaluation quantitative multicritères, nous ne disposons pas de l'ensemble des données nécessaires. Ces dernières sont réparties parmi les différentes parties prenantes, et sont le plus souvent sensibles et peu communicables. Par conséquent, nous mettons à disposition des futurs décideurs une méthodologie qui s'appuie sur l'identification de **critères 'de succès'**, permettant de juger la pertinence d'entreprendre l'activité de reconditionnement par une **partie prenante** donnée pour une **application 2nde vie donnée**.

Notre contribution est une méthodologie d'aide à la décision, que nous avons baptisée **MadOFR** (Méthodologie d'aide à la décision pour l'Organisation de la Filière de Reconditionnement). Elle est construite à travers les trois étapes suivantes :

- 1- Etat de l'art sur les applications 2nde vie ;
- 2- Identification de la structure de la filière de reconditionnement actuelle, si elle existe ;
- 3- Choix des structures potentielles de la filière de reconditionnement.

Ainsi, notre méthodologie va construire progressivement **des combinaisons (application 2nde vie, partie prenante) potentielles**, afin d'éclairer les choix d'un futur décideur, sa logique est illustrée dans la figure suivante.

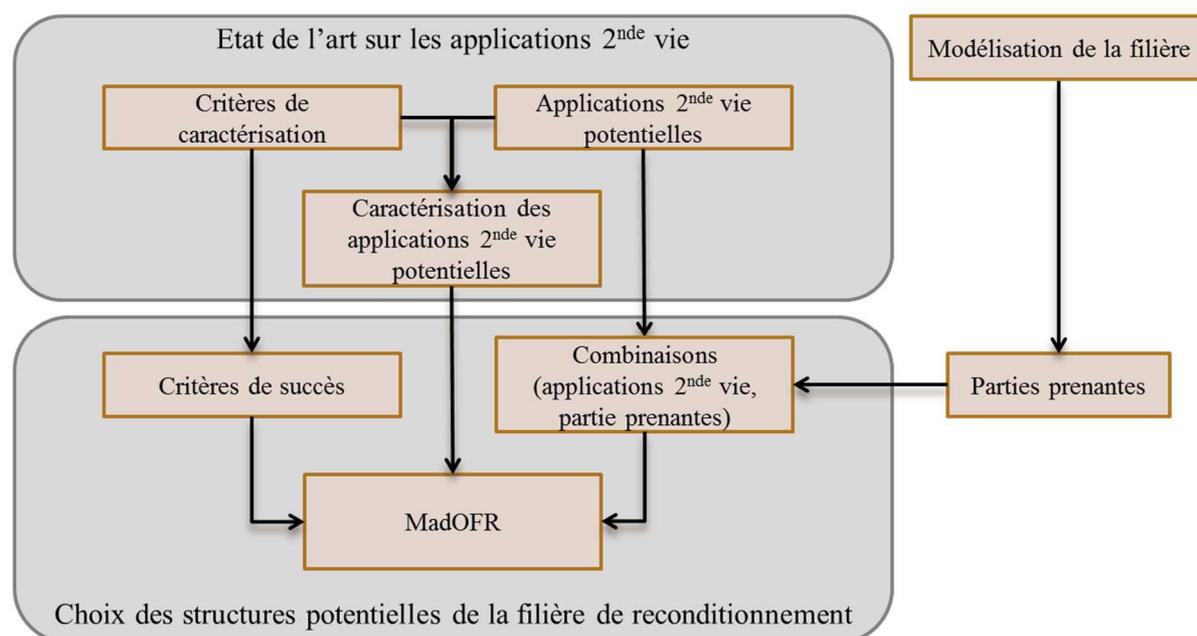


Figure 5.4. Logique de construction et de fonctionnement de MadOFR.

A présent, nous allons mettre en œuvre les trois étapes ci-dessus pour la construction de MadOFR, à commencer par l'état de l'art sur les applications 2nde vie.

5.2.1 Etat de l'art sur les applications 2nde vie

Un état de l'art des applications 2nde vie est présenté dans cette section. Il nous permettra de sélectionner les applications les plus pertinentes à considérer pour la suite. Il s'agit de construire le premier membre de la combinaison (**application 2nde vie, partie prenante**). Dans cet état de l'art, nous allons aussi identifier des **critères de 'caractérisation'** porteurs d'informations d'un point de vue organisationnel, notamment sur les attributs des parties prenantes, nécessaires à la mise en œuvre de l'activité de reconditionnement pour ces applications 2nde vie.

Deux classifications des applications 2^{nde} vie sont identifiées dans cet état de l'art. La classification en deux catégories (petites et larges) proposée par (Ahmadi et al., 2014a; Heymans et al., 2014) et la classification en trois catégories, proposée par (Törkler, 2014) dans le cadre du projet ELIBAMA (voir 2.2.2 pour plus d'informations sur le projet):

- Applications résidentielles (3 - 4 kWh) ;
- Applications commerciales (25 kWh à 4 MWh) ;
- Applications industrielles liées à l'énergie (jusqu'à 50 MWh).

Dans notre travail, nous adoptons la seconde car elle comporte plus d'informations que la première. De plus, elle renvoie aux marchés et aux utilisateurs de l'application 2^{nde} vie, ce qui nous permet de faire le lien avec les parties prenantes de la filière de valorisation.

En nous appuyant sur cette classification, nous synthétisons les applications 2^{nde} vie identifiées dans cet état de l'art au le tableau suivant. Il s'agit d'applications jugées pertinentes par au moins une étude. A titre d'exemple, Törkler (2014) a retenu 4 parmi 9 applications issues d'une étude interne menée par Daimler. Une étude qui avait analysé 109 idées d'applications 2^{nde} vie au départ (Törkler, 2014).

Catégorie	Capacité	Application 2 ^{nde} vie	Pertinence de l'application 2 ^{nde} vie
Résidentielles	3 - 4 kWh	Stockage résidentiel	Jugée pertinente par (Ahmadi et al., 2014a; Heymans et al., 2014)
Commerciales	25 kWh à 4 MWh	Tours de télécommunication	Jugée pertinente par (Ahmadi et al., 2014a; Heymans et al., 2014; Törkler, 2014)
		Petits commerces	Jugées pertinentes par (Ahmadi et al., 2014a; Heymans et al., 2014)
		Immeubles de bureaux	
		Grande distribution	Jugées pertinentes par (ADEME, 2011) et non pertinente par (Törkler, 2014) (ELIBAMA) selon les critères : compétitivité, taille du marché et coût du reconditionnement
		Réutilisation dans des véhicules électriques	
		Réutilisation dans des véhicules industriels	
		Lissage de la pointe des sous-stations SNCF	
		Remplacement des groupes électrogènes d'ERDF	
		Alimentations électriques sans coupure	Jugée pertinente par (ADEME, 2011) et (Törkler, 2014) (ELIBAMA)
Industrielles liées à l'énergie	jusqu'à 50 MWh	Support de la transmission	Jugées non pertinentes actuellement par (Heymans et al., 2014) et (Törkler, 2014) (ELIBAMA) à cause de la faible taille du marché VE, par conséquent du nombre limité de batteries disponibles.
		Stockage d'énergie renouvelable	
		Réglage de fréquence	

Tableau 5.3. Applications 2^{nde} vie identifiées.

A travers ces différentes études, nous synthétisons les applications 2^{nde} vie pertinentes que nous considérons dans ce chapitre.

Dans la catégorie des **applications résidentielles**, l'application « *stockage résidentiel* » a été considérée et analysée dans (Ahmadi et al., 2014a; Heymans et al., 2014). C'est également le cas dans le cadre du projet ABattReLife²¹. C'est sans doute, l'application 2^{nde} vie avec le plus grand potentiel de marché et qui nécessite le moins de batteries reconditionnées pour démarrer. **En ce qui nous concerne, nous retenons cette application de stockage résidentiel pour l'étudier d'un point de vue organisationnel.**

Dans la catégorie des **applications commerciales**, l'application 2^{nde} vie « *alimentations électriques sans coupure* » a été retenue par (ADEME, 2011) et par le projet ELIBAMA. Elle a été également retenue par (Ahmadi et al., 2014a; Heymans et al., 2014), qui ont pris l'application « *tours de télécommunication* », qui est uniquement un exemple dans l'application globale « *alimentations électriques sans coupure* ».

Les applications « *petits commerces* », « *immeubles de bureaux* » et « *grande distribution* » présentent les mêmes caractéristiques (taille du marché, nombre de batteries nécessaires, sollicitation des batteries) (Ahmadi et al., 2014a; Heymans et al., 2014). D'un point de vue organisationnel, toutes les applications de cette deuxième catégorie se caractérisent de la même façon ; les clients de ces options sont des institutions (hôpital, société de télécommunication, chaîne de distribution, SNCF, ERDF, etc.).

Les applications de réutilisation des batteries dans des véhicules industriels ne sont pas retenues dans notre travail, du fait du coût élevé du reconditionnement. C'est également le cas de la réutilisation des batteries pour des véhicules électriques, qui vont très probablement rester dans le circuit automobile, ce qui ne pose pas d'enjeux quant à l'organisation de cette application.

Nous retenons l'application « *tours de télécommunication* », comme application représentative de cette catégorie, afin de l'étudier d'un point de vue organisationnel.

Enfin, les **applications industrielles liées à l'énergie** n'ont pas été considérées dans cet état de l'art. L'argument avancé est celui de la taille du marché VE, trop petit pour fournir les batteries nécessaires pour ces applications qui en demandent de grandes quantités. Etant dans une étude prospective, où ces volumes de batteries seront disponibles dans l'avenir, **nous**

²¹ Voir chapitre 2 pour plus d'informations sur le projet

retenons l'application « stockage d'énergie renouvelable », comme application représentative de cette catégorie, afin de l'étudier d'un point de vue organisationnel.

Maintenant que nous avons identifié les applications 2^{nde} vie pertinentes (stockage résidentiel, tours de télécommunication et stockage d'énergie renouvelable) passons aux **critères de caractérisation** de ces dernières. Nous synthétisons les critères utilisés dans les études précitées au tableau suivant. Nous définissons les critères retenus juste après.

Référence	Critères considérés
(Ahmadi et al., 2014a; Heymans et al., 2014)	Taille du marché potentiel et nombre de packs reconditionnés
(ADEME, 2011)	Sévérité de l'usage en seconde vie, complexité du reconditionnement, compétitivité par rapport aux solutions alternatives et taille du marché potentiel
(Törkler, 2014) (ELIBAMA)	Compétitivité, taille du marché et coût du reconditionnement

Tableau 5.4. Critères de caractérisation des applications 2^{nde} vie identifiées.

L'ensemble des critères utilisés pour caractériser les applications ci-dessus sont les suivants : « *taille du marché potentiel* », « *nombre de packs reconditionnés* », « *complexité du reconditionnement* », « *sévérité de l'usage en seconde vie* », « *coût du reconditionnement* » et « *compétitivité par rapport aux solutions alternatives* ». Les critères « *sévérité de l'usage en seconde vie* », « *coût du reconditionnement* » et « *compétitivité par rapport aux solutions alternatives* » ne sont pas discriminants d'un point de vue organisationnel. Ces derniers donnent une information sur la pertinence d'une application 2^{nde} vie, mais ils n'ont pas d'incidence sur les acteurs susceptibles d'entreprendre l'activité de reconditionnement. Par conséquent, ils ne sont pas retenus dans notre travail.

Nous adoptons les critères : « *taille du marché potentiel* », « *nombre de packs reconditionnés* », « *complexité du reconditionnement* », auxquels nous rajoutons deux critères « *Utilisateur 2^{nde} vie* » et « *complexité de la gestion opérationnelle* ».

Ces cinq critères sont définis comme suit :

- *Utilisateur 2^{nde} vie* : il s'agit des clients du reconditionnement. Ce critère permet de détailler cette partie prenante, que nous avons introduite d'une manière générique jusqu'ici. Exemple : les utilisateurs 2^{nde} vie du stockage résidentiel sont les particuliers et les gestionnaires d'immeubles collectifs.
- *Taille du marché potentiel* : cela fait référence au nombre de systèmes reconditionnés que le marché de cette application est capable de recevoir. Exemple : en Europe, il y a

des dizaines de millions de résidences, qui peuvent être équipées d'un système de stockage à base de BLIs reconditionnées.

- *Nombre de packs reconditionnés* : cela fait référence au nombre de packs nécessaires pour fabriquer un nouveau système de stockage, à ne pas confondre avec le nombre de packs pour satisfaire tout le marché potentiel. Nous rappelons qu'il existe des BLIs de véhicules tout électriques (VE), hybrides rechargeables (VHR) et hybrides (VHY). Celles qui sont susceptibles d'être réutilisées en 2nde vie, sont celles provenant de VE et de VHR, mais nous allons exprimer ce critère en équivalent BLIs de VE²². Exemple : il faut entre 1 et 2 BLIs en fin de vie pour fabriquer un système utilisé dans le stockage résidentiel.
- *Complexité du reconditionnement* : il s'agit du niveau de démontage et de reconfiguration des BLIs, de l'élaboration du nouveau système de stockage et de son système de gestion (BMS). Un reconditionnement complexe nécessite la possession d'une compétence technique en lien avec les batteries. Exemple : pour le stockage résidentiel, les batteries peuvent être réutilisées en petit nombre, directement dans leurs packs d'origine, ce qui implique une faible complexité de reconditionnement.
- *Complexité de la gestion opérationnelle* : cela fait référence aux problématiques liées à la fiabilité/sécurité/traçabilité/maintenance des systèmes de stockage à installer. La complexité de gestion opérationnelle est très corrélée avec la taille du marché potentiel. Exemple : le stockage résidentiel présente une complexité élevée de gestion, induite par des risques de sécurité, des difficultés de traçabilité et de maintenance dues à la dispersion élevée des utilisateurs, ce qui pourrait freiner l'émergence de cette application.

Les trois applications retenues sont caractérisées dans le contexte européen dans le tableau suivant. **Cette caractérisation est une contribution de notre travail**, notamment sur le choix des applications 2nde vie, le choix des critères de caractérisation existants et l'élaboration de nouveaux critères.

²² On peut estimer qu'une BLI provenant d'un VE est équivalente à deux BLIs provenant d'un VHR.

Application 2 nd e vie	Utilisateur 2 nd e vie	Taille du marché potentiel ²³	Nombre de packs reconditionnés	Complexité du reconditionnement	Complexité de la gestion opérationnelle
Stockage résidentiel	Particuliers, Gestionnaires d'immeubles	Dizaines de millions	1 - 2	Faible	Elevée
Tours de télécommunication	Sociétés de télécommunication	millions	5 - 10	Moyenne	Moyenne
Stockage d'énergie renouvelable	Energéticien	Centaines	Centaines, milliers	Elevée	Faible

Tableau 5.5. Caractérisation des applications retenues (notre contribution).

Avant de passer à l'étape suivante, il est intéressant de noter que dans cet état de l'art et celui exposé au chapitre 2 (2.2.2), nous avons identifié un seul travail qui a abordé l'organisation de la filière sur le périmètre de l'activité de reconditionnement : (ADEME, 2011). Ce dernier conclut que la filière va probablement se structurer autour du constructeur automobile, compte tenu de leurs savoir-faire spécifiques, leurs soucis de l'image de marque et la responsabilité légale des batteries. Toutefois, il n'écarte pas la possibilité de structuration de la filière à l'initiative d'un nouvel acteur.

5.2.2 Identification de la structure de la filière de reconditionnement « actuelle »

Nous l'avons évoqué précédemment, il n'existe pas actuellement d'activité industrielle de reconditionnement de BLI. Cependant, nous avons identifié un certain nombre d'initiatives et de projets pilotes, qui sont mis en place pour servir comme tests et démonstrateurs. Nous allons les recenser afin de mettre en évidence les parties prenantes qui sont déjà impliquées dans le reconditionnement et vis-à-vis de quelles applications 2nde vie.

- Intégration des batteries Toyota dans une installation de panneaux solaires implantés sur le toit d'une concession au Pays-Bas (Wehicles, 2014).
- GM et ABB (fournisseur d'équipements et d'expertise dans le domaine des chargeurs électriques) ont réalisé un prototype sur la base de cinq batteries Chevrolet Volt, capable de fournir de l'électricité à un groupe de trois à cinq maisons (La Presse, 2012).
- La joint-venture « 4R » (entre Nissan et Sumitomo) a mis au point un système de stockage sur la base de 16 BLIs dans une station solaire d'une capacité de 10 MW (Nissan, 2014).

²³ Il s'agit d'un ordre de grandeur, les vraies estimations étant difficiles et en particulier évolutives, contrairement aux autres critères.

- Les projets de recherche : ELIBAMA, ABattReLife que nous avons introduits dans l'état de l'art sur les applications 2^{nde} vie (5.2.1), on peut également citer le projet « Second Life Batteries » entre BMW et Vattenfall (fournisseur d'énergie) (Avem, 2013).

Il apparaît que les **constructeurs** sont au premier plan dans ces initiatives. Les **recycleurs** sont présents dans les projets de recherche, tout comme les **énergéticiens**. Concernant les **fabricants de batteries**, aujourd'hui, ils ne communiquent pas sur des initiatives dans ce domaine, pour des raisons évidentes de confidentialité. En termes d'applications 2^{nde} vie, le **stockage résidentiel** et le **stockage d'énergie renouvelable** semble être les premières applications testées.

Cette deuxième étape nous a permis de dresser un état des lieux actuel sur les parties prenantes et les applications 2^{nde} vie déjà engagées, et de confirmer la validité de la plupart des parties prenantes et applications 2^{nde} vie déjà identifiées.

5.2.3 Choix des structures potentielles de la filière de reconditionnement

En prenant en compte les différentes parties prenantes, il apparaît une multitude de combinaisons possibles pour chacune des trois applications 2^{nde} vie retenues. Cette étape de la démarche a pour but le choix des combinaisons (application 2^{nde} vie, partie prenante) potentielles grâce aux **critères 'de succès'** que nous proposons ici. Il s'agit de critères permettant de juger la pertinence d'entreprendre l'activité de reconditionnement pour une application 2^{nde} vie donnée, par une partie prenante donnée.

Nous avons introduit quatre critères de succès, que nous pouvons scinder en 3+1 critères. Trois premiers quantitatifs, concernant les compétences nécessaires à avoir par les parties prenantes. Autrement dit, répondre à la question : « **cette partie prenante a-t-elle la capacité d'intégrer l'activité de reconditionnement?** ». Nous les avons établis en nous inspirant des critères caractérisant les applications 2^{nde} vie, cités ci-avant. Puis, un dernier critère de succès qualitatif, concernant la motivation nécessaire à avoir par les parties prenantes. Autrement dit, répondre à la question : « **cette partie prenante a-t-elle un intérêt à intégrer l'activité de reconditionnement?** ».

Nous allons développer ces quatre critères de succès dans les paragraphes suivants.

Les critères « *taille du marché potentiel* », « *nombre de packs reconditionnés* », « *complexité du reconditionnement* » et « *complexité de la gestion opérationnelle* » nous informent sur les moyens à mettre en œuvre. Plus ces quatre critères sont importants, plus les moyens à mettre en œuvre sont importants. Par conséquent, nous identifions le premier critère de succès : « **Capacité d'investir** », qui traduit la capacité d'une partie prenante à disposer des moyens financiers suffisants pour investir et gérer l'activité de reconditionnement.

Les critères « *complexité du reconditionnement* » et « *nombre de packs reconditionnés* » nous informent sur le niveau de démontage et reconfiguration des batteries en fin de vie. Un reconditionnement complexe suppose un démontage de la batterie jusqu'au niveau des modules/cellules et un changement du système de gestion de la batterie, ce qui nécessite la possession d'une compétence technique associée aux batteries. Par conséquent, nous identifions le deuxième critère de succès : « **Compétence technique** », qui traduit la capacité d'une partie prenante à disposer d'une connaissance technique suffisante pour procéder au reconditionnement.

Les critères « *taille du marché potentiel* » et « *nombre de packs reconditionnés* » nous informent sur la sensibilité de la partie prenante qui entreprend le reconditionnement par rapport au volume des batteries en fin de vie. Si une application 2nde vie nécessite un nombre faible de packs, alors cette dernière est moins sensible au volume des batteries en fin de vie. Par conséquent, nous identifions le troisième critère de succès : « **Captation des volumes** », qui traduit la capacité d'une partie prenante à disposer d'un volume de batteries suffisant pour procéder au reconditionnement.

Ces trois critères (capacité d'investir, compétence technique, captation des volumes) constituent ce que nous pourrions qualifier de **conditions nécessaires** pour la mise en place de l'activité de reconditionnement par une partie prenante donnée. Nous allons maintenant identifier leur caractère suffisant ou non.

Nous pouvons imaginer une situation où toutes les conditions citées plus haut sont réunies par une partie prenante, sans pour autant, qu'elle manifeste un intérêt pour se lancer dans une activité de reconditionnement. Nous expliquons cela par la notion de **rationalité limitée**, introduite par Herbert A. Simon (Simon, 1955).

Pour Simon, les acteurs économiques sont limités par leurs capacités cognitives et les informations dont ils disposent. Ce qui laisse une place à l'imprévisible et à l'irrationnel dans les positionnements des parties prenantes sur l'activité de reconditionnement.

Afin de prendre en compte ces situations, nous rajoutons le quatrième critère de succès : « **Intérêt à agir** », qui traduit l'existence ou inexistence d'un intérêt chez une partie prenante pour se lancer dans le reconditionnement. Les éléments qui motivent ou non cet intérêt relèvent de la conviction et de la stratégie de la partie prenante (politique d'entreprise, stratégie d'investissement, prise de risque, réticence au changement, extension des métiers, etc.). Nous illustrons ce dernier critère de succès à travers le cas « KodaK ».

Kodak est l'inventeur du numérique. C'est en 1995 qu'il sortit son premier appareil photo numérique, le DCS 5. Pourtant, il peina à s'adapter au marché du numérique dans les années 2000. Il a préféré se concentrer sur son cœur de métier (la chimie) et ne pas s'aventurer sur des technologies concurrentes (l'électronique). Selon F. Sauteron, ancien DRH monde du groupe, et auteur de « La chute de l'empire Kodak », le numérique n'a pas été pris au sérieux par les responsables de Kodak : « *Quand vous avez 90 % de part de marché aux Etats-Unis, vous vous croyez tout-puissant. Cela a conduit Kodak à ignorer plusieurs innovations* ».

L'exemple Kodak montre que les décisions des entreprises ne sont pas toujours motivées par des éléments rationnels, mais parfois un reflet des éléments qui constituent son identité propre (cœur de métier, orientations stratégiques, intimes convictions, etc.).

Nous récapitulons les critères de succès que nous avons identifiés : « **Capacité d'investir** », « **Compétence technique** », « **Captation des volumes** » et « **Intérêt à agir** ».

Nous rappelons les parties prenantes que nous avons retenues, sont: « Constructeur automobile », « Fabricant de batteries », « Recycleur », « Reconditionneur » et « **Utilisateur 2^{nde} vie** ». Cette dernière partie prenante a été détaillée au Tableau 5.5. **Désormais, nous retenons juste les énergéticiens comme utilisateurs 2^{nde} vie**, susceptibles d'entreprendre le reconditionnement pour la 2^{nde} vie. Les utilisateurs 2^{nde} vie des applications résidentielles et commerciales (particuliers, sociétés de télécommunication, chaînes de distribution, etc.) n'ont pas actuellement les compétences nécessaires pour entreprendre l'activité de reconditionnement. Cela pourrait évoluer dans le futur, ce qui amènera à les inclure aussi.

Les combinaisons (application 2^{nde} vie, partie prenante) peuvent être analysées selon ces quatre critères de succès dans le tableau suivant.

Application 2 nd e vie	Partie prenante	capacité d'investir	Compétence technique	Captation des volumes	Intérêt à agir
Stockage résidentiel	Constructeur automobile				
	Fabricant de batteries				
	Recycleur				
	Energéticien				
	Reconditionneur				
Tours de télécommunication	Constructeur automobile				
	Fabricant de batteries				
	Recycleur				
	Energéticien				
	Reconditionneur				
Stockage d'énergie renouvelable	Constructeur automobile				
	Fabricant de batteries				
	Recycleur				
	Energéticien				
	Reconditionneur				

Tableau 5.6. Caractérisation des combinaisons (Application 2nde vie, partie prenante).

Ce tableau a pour but d'éliminer les combinaisons pour lesquelles les conditions de succès ne sont pas réunies. Il permet d'identifier et choisir les structures potentielles, en répondant aux questions : « Cette partie prenante a-t-elle la capacité d'intégrer l'activité de reconditionnement? », « cette partie prenante a-t-elle un intérêt à intégrer l'activité de reconditionnement? ».

L'analyse complète au travers du tableau ci-dessous nécessite de bénéficier de nombreuses données. Les valeurs à reporter dans ce tableau sont éminemment évolutives, sensibles car peu communicables publiquement et concernent plusieurs parties prenantes. Nous ne disposons pas aujourd'hui de l'ensemble de ces valeurs qui nécessiteraient des enquêtes et évaluations poussées de chacun des critères.

Cependant, au travers de l'identification de critères pertinents, notre travail a permis de mettre en évidence une méthodologie d'aide à la décision, permettant d'éclairer les choix de futurs décideurs. Afin de montrer la pertinence de la méthodologie et de son usage, nous allons proposer un jeu de valeurs à titre d'exemple

5.2.4 Exemple d'illustration

Prenons pour exemple, l'application 2nde vie : « *Tours de télécommunication* ». Nous rappelons que nous l'avons caractérisée de la manière suivante :

Application 2 nd e vie	Utilisateur 2 nd e vie	Taille du marché potentiel	Nombre de packs reconditionnés	Complexité du reconditionnement	Complexité de la gestion opérationnelle
Tours de télécommunication	Sociétés de télécommunication	millions	5 - 10	Moyenne	Moyenne

Tableau 5.7. Rappel de la caractérisation de l'application : Tours de télécommunication.

Passons maintenant à l'évaluation de la faisabilité des combinaisons (Tours de télécommunication, partie prenante) à l'aide de MadOFR.

Dans le Tableau 5.6, nous avons pris les parties prenantes d'une manière générique, ce qui suppose des évaluations identiques pour tous les acteurs appartenant à la même catégorie de parties prenantes. Or, ce n'est pas le cas, notamment sur le dernier critère de succès (intérêt à agir), qui est propre à chaque entreprise. Nous pouvons donner l'exemple de PSA Peugeot Citroën qui est centré sur ses activités propres et travaille en partenariat, contrairement à Renault ou Volkswagen, qui à titre d'exemple, ont étendu leurs périmètres d'interventions au recyclage des véhicules hors d'usage.

Par conséquent, le futur utilisateur doit renseigner les entreprises réelles qu'il souhaite investiguer, dans les catégories de parties prenantes auxquelles elles appartiennent. Exemple : renseigner « SAFT » comme fabricant de batteries. Cependant, dans un souci de simplification et d'impartialité, nous allons garder la généricité des parties prenantes dans cet exemple.

Comme évoqué précédemment, il est difficile de remplir toutes les informations de ce tableau d'une manière totalement objectivée. Un tel exercice doit faire l'objet d'un workshop faisant intervenir des experts avec des compétences techniques et managériales. Nous synthétisons l'ensemble des hypothèses prises pour renseigner ce tableau dans les paragraphes suivants.

Pour ce faire, nous allons utiliser une échelle de notation de 1 à 5 : Faible (1 ou 2), Moyen (3) et Fort (4 ou 5), qui nous semble pertinente pour discriminer les combinaisons potentielles. Un code couleur pourra également être utilisé pour traduire le degré d'incertitude sur les évaluations.

Commençons par le premier critère de succès, à savoir la **capacité d'investir**. Nous rappelons que nous l'avons introduit à partir des critères de caractérisation : « *taille du marché potentiel* », « *nombre de packs reconditionnés* », « *complexité du reconditionnement* » et « *complexité de la gestion opérationnelle* ». Il traduit la capacité d'une partie prenante à disposer des moyens financiers suffisants pour investir et gérer l'activité de reconditionnement.

L'application « *Tours de télécommunication* » nécessite une dizaine de packs par nouveau système, pour un marché potentiel de l'ordre de millions d'unités. En prenant en compte les *complexités de reconditionnement et de gestion opérationnelle* qui sont 'moyennes', on peut s'attendre à un niveau d'investissement conséquent.

Nous estimons que seules les grandes entreprises, type constructeurs automobiles, fabricants de batteries ou énergéticiens peuvent disposer d'une telle capacité d'investissement. Le reconditionneur, qui est un nouvel acteur, se devra d'avoir les moyens financiers pour se lancer dans cette nouvelle activité. Enfin, les recycleurs sont plutôt des petites structures, qui disposent de moins de ressources financières, à l'exception des sociétés minières. Nous en déduisons la notation suivante sur le critère « *capacité à investir* » :

Application 2 nd e vie	Partie prenante	capacité d'investir
Tours de télécommunication	Constructeur automobile	Forte (4)
	Fabricant de batteries	Forte (4)
	Recycleur	Moyenne (3)
	Energéticien	Forte (4)
	Reconditionneur	Forte (4)

Tableau 5.8. Notation du critère « *capacité à investir* ».

Le second critère est la **compétence technique**. Il découle des critères « *complexité du reconditionnement* » et « *nombre de packs reconditionnés* », il traduit la capacité d'une partie prenante à disposer d'une connaissance technique suffisante pour procéder au reconditionnement.

L'application « *Tours de télécommunication* » nécessite un niveau de compétence technique moyen, en comparaison avec d'autres applications (Tableau 5.5). Seuls les acteurs présents en amont de la chaîne de valeur des BLIs ont cette compétence aujourd'hui, à savoir les constructeurs automobiles et les fabricants de batteries. Le reconditionneur va investir pour

acquérir cette compétence. Les recycleurs vont progressivement l'acquérir. Nous proposons donc la notation suivante pour le critère « compétence technique » :

Application 2 nd e vie	Partie prenante	Compétence technique
Tours de télécommunication	Constructeur automobile	Forte (4)
	Fabricant de batteries	Forte (5)
	Recycleur	Faible (2)
	Energéticien	Faible (1)
	Reconditionneur	Moyen (3)

Tableau 5.9. Notation du critère « compétence technique ».

Le troisième critère est la **captation des volumes**. Il découle des critères « *taille du marché potentiel* » et « *nombre de packs reconditionnés* », il traduit la capacité d'une partie prenante à disposer d'un volume de batteries suffisant pour procéder au reconditionnement. Nous en déduisons que l'application « *Tours de télécommunication* » est sensible au volume des batteries en fin de vie. Seuls les acteurs du circuit de valorisation obligatoire ont la capacité de capter les volumes en fin de vie. Nous en déduisons la notation suivante pour le critère « captation des volumes » :

Application 2 nd e vie	Partie prenante	Captation des volumes
Tours de télécommunication	Constructeur automobile	Forte (4)
	Fabricant de batteries	Faible (1)
	Recycleur	Forte (4)
	Energéticien	Faible (1)
	Reconditionneur	Faible (1)

Tableau 5.10. Notation du critère « captation des volumes ».

Enfin, le dernier critère est **l'intérêt à agir**. Nous rappelons que nous allons répondre d'une manière générique aux diverses parties prenantes, même si ces dernières ont des identités propres différentes.

Les constructeurs sont responsables de la fin de vie de la batterie. Le développement des applications 2nde vie pourra optimiser le coût de traitement de cette fin de vie. Néanmoins, cette activité de reconditionnement ne fait pas partie de leur périmètre 'habituel'.

Les fabricants de batteries et les recycleurs ne souhaiteraient pas, à priori, le développement de la 2nde vie, puisqu'elle représente un marché en compétition avec les leurs (batteries neuves pour les fabricants de batteries et recyclage des batteries pour les recycleurs). Cependant, ils ont intérêt à anticiper et à être présents sur ce marché, s'il venait à se concrétiser.

Les énergéticiens ont un intérêt à agir pour l'application 2nde vie qui les concerne, mais pas pour le reste des applications. Enfin, le reconditionneur a par défaut comme cœur de métier l'activité de reconditionnement, d'où un très fort intérêt à agir pour cette dernière.

En incluant la notation du critère « intérêt à agir » avec les critères précédents, nous obtenons le tableau final suivant.

Application 2 nd e vie	Partie prenante	capacité d'investir	Compétence technique	Captation des volumes	Intérêt à agir
Tours de télécommunication	Constructeur automobile	Forte (4)	Forte (4)	Forte (4)	Moyen (3)
	Fabricant de batteries	Forte (4)	Forte (5)	Faible (1)	Fort (4)
	Recycleur	Moyenne (3)	Faible (2)	Forte (4)	Fort (4)
	Energéticien	Forte (4)	Faible (1)	Faible (1)	Faible (1)
	Reconditionneur	Forte (4)	Moyen (3)	Faible (1)	Fort (5)

Tableau 5.11. Evaluation de la faisabilité des combinaisons (Tours de télécommunication, partie prenante)

L'aide à la décision est permise en exploitant le tableau ci-dessus, et en faisant appel à des représentations graphiques (Figure 5.5) et des agrégations de critères (Tableau 5.12).

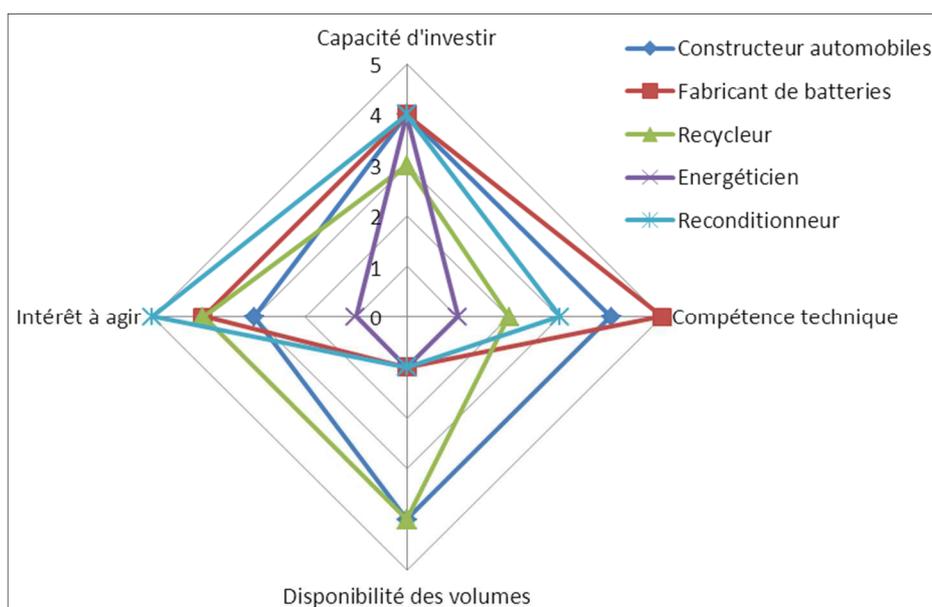


Figure 5.5. Performances des parties prenantes sur les quatre critères de succès.

Nous remarquons qu'il n'y a pas de profil dominant sur tous les critères. Cela rend moins évident, l'émergence d'une partie prenante pour entreprendre l'activité de reconditionnement de cette application (Tours de télécommunication).

Il est également possible d'agréger différents critères afin de mettre en évidence le positionnement des parties prenantes. En effectuant une moyenne sur les trois premiers critères de succès, que nous avons qualifiés de conditions nécessaires (Tableau 5.12), les constructeurs apparaissent bien placés pour mettre en œuvre cette activité de reconditionnement eux-mêmes, ou sous leur responsabilité. A l'exception des énergéticiens, des partenariats peuvent être envisagés entre le constructeur et le reste des parties prenantes, notamment pour leur complémentarité sur le critère « Intérêt à agir » (Tableau 5.12).

Application 2 nd e vie	Partie prenante	Moyenne sur les 3 premiers critères	Intérêt à agir
Tours de télécommunication	Constructeur automobiles	4,0	Moyen (3)
	Fabricant de batteries	3,3	Fort (4)
	Recycleur	3,0	Fort (4)
	Energéticien	2,0	Faible (1)
	Reconditionneur	2,7	Fort (5)

Tableau 5.12. Agrégation des critères de succès.

Dans l'agrégation ci-dessus, tous les critères ont le même poids. Or selon le donneur d'ordre utilisant cette méthodologie d'aide à la décision, les critères peuvent avoir des pondérations différentes, conduisant à des conclusions différentes.

Nous rappelons bien évidemment qu'il s'agit d'un exemple hypothétique et que les conclusions que nous avons dressées sont à prendre avec des réserves. Bien entendu, pour une autre application 2nde vie, un autre cadre d'usage, les conclusions peuvent être différentes. Le but est de donner un aperçu des conclusions obtenues avec MadOFR, afin de faciliter l'aide à la décision. L'exemple permet de mettre en évidence les modes d'utilisation de l'outil proposé et les voies de comparaison possibles.

5.2.5 Récapitulatif de MadOFR

La méthodologie est élaborée progressivement à travers notre démarche en trois étapes, sa logique est rappelée dans la figure suivante.

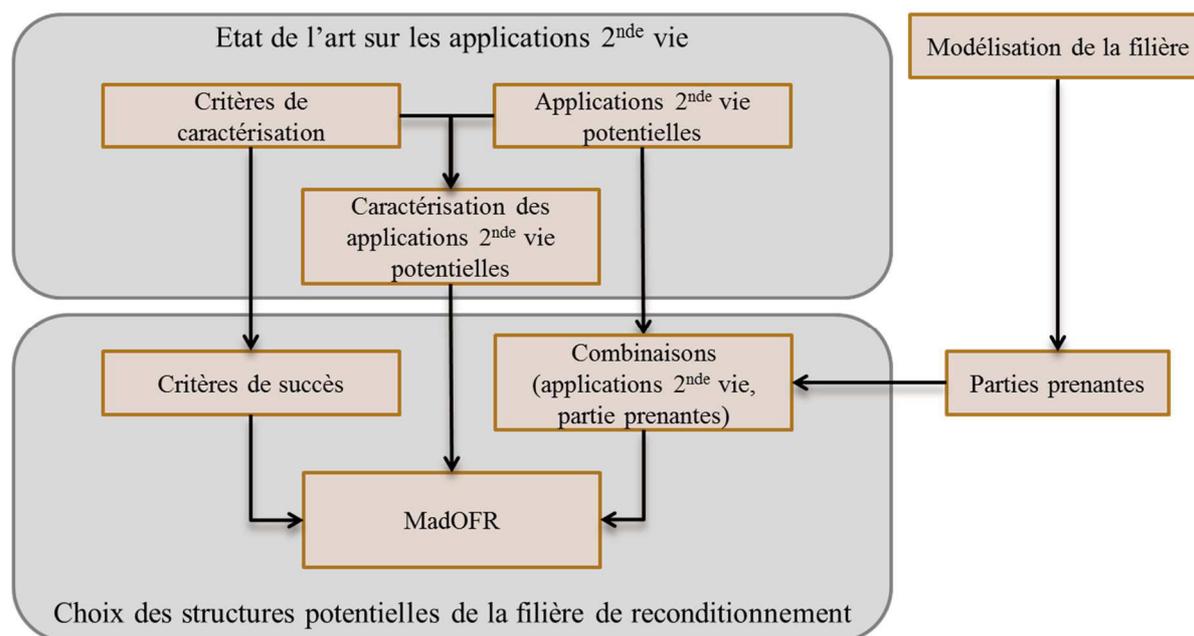


Figure 5.6. Rappel de la logique de construction et de fonctionnement de MadOFR.

L'état de l'art que nous avons mené à la première étape nous a permis d'identifier les applications 2nd vie pertinentes ou potentielles, il nous a aussi permis d'identifier des critères de caractérisation de ces dernières, auxquels nous avons ajouté deux critères que nous avons établis. Dans la troisième étape, nous avons introduit des critères de succès, permettant de juger la pertinence d'entreprendre l'activité de reconditionnement pour une application donnée, par une partie prenante donnée. Nous avons établi ces critères en nous appuyant, en partie, sur les critères de caractérisation des applications 2nd vie. Avec ces éléments, un futur utilisateur a les éléments en main pour analyser les combinaisons (application 2nd vie, partie prenante) afin d'éclairer sa prise de décision.

En termes d'usage concret de MadOFR, nous pouvons citer les situations suivantes :

- Un ensemble de parties prenantes impliquées dans un projet de recherche, qui souhaitent évaluer les positionnements de chacune sur la question de la 2nd vie, afin d'identifier de potentielles synergies.
- Une partie prenante qui s'intéresse au reconditionnement, mais ne sait pas encore pour quelle applications 2nd vie, elle pourra faire appel à MadOFR pour identifier l'application pour laquelle elle est la mieux placée.
- Une partie prenante qui souhaite évaluer les points forts et points faibles de ses potentiels concurrents, pour une application 2nd vie donnée.
- Une partie prenante qui cherche des compétences complémentaires chez d'autres parties prenantes, en vue d'un partenariat.

- Un donneur d'ordre qui souhaite identifier la bonne partie prenante à mandater, notamment les constructeurs qui souhaiteraient sous-traiter cette activité.
- Un futur travail de recherche qui s'intéresse à l'organisation de la filière sur le périmètre de l'activité de reconditionnement.
- Une partie prenante qui souhaite objectiver des conclusions intuitives par une méthodologie plus formelle.

L'un des avantages de MadOFR est l'inclusion des aspects rationnels et irrationnels de la prise de décision. Le critère de succès : « Intérêt à agir », constitue une originalité de la méthodologie et une dimension à ne pas négliger dans l'analyse. En effet, l'histoire a montré par le passé, que la prise de décision n'est pas motivée uniquement par des stimuli quantitatifs et rationnels, ce qui peut conduire à des paradoxes constatés à posteriori. Ainsi, notre démarche s'ouvre et laisse la place à de nouvelles interrogations, rendant la prospective plus pertinente.

Le second avantage de MadOFR est la mise en évidence des enjeux et questions liés à l'organisation de la filière sur le périmètre de l'activité de reconditionnement. Un futur travail pourra partir sur ces bases pour une réflexion plus approfondie (utilisation des outils de la veille et de l'intelligence économique, analyse de brevets, utilisation des outils d'aide à la décision multicritères, etc.).

Pour récapituler, la méthodologie d'aide à la décision que nous avons élaborée dans ce chapitre est l'aboutissement de notre réflexion sur la deuxième question de recherche, en identifiant les parties prenantes, les applications 2nde vie et les critères de succès. Un exemple de résultat issu de l'utilisation de MadOFR est fourni afin d'illustrer les modes d'utilisation et les voies de comparaison possibles.

Cette méthodologie d'aide à la décision a pour perspective l'élaboration d'un outil plus formel pour sa mise en œuvre, avec un support informatique, un manuel d'utilisation ainsi qu'un guide permettant de renseigner les différents critères.

5.3 Conclusions du chapitre 5

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à l'analyse de la gouvernance de la filière de valorisation des BLIs. Dans un premier temps, nous avons précisé le périmètre de cette analyse, à commencer par la notion de gouvernance. Dans notre travail, l'analyse de la gouvernance en prospective revient à analyser des combinaisons de répartition (activité, partie

prenante). Puis, nous avons limité le périmètre des activités à celui de l'activité de reconditionnement, considérant son impact, incertitude et les hypothèses suivantes :

- Hypothèse (5.1) : L'activité l'inspection/tri sera entreprise par l'une des parties prenantes : constructeur, recycleur ou reconditionneur.
- Hypothèse (5.2) : Les activités: collecte, transport pour reconditionnement et pour recyclage ainsi que la partie prenante logisticien peuvent être soustraites de l'analyse.
- Hypothèse (5.3) : L'activité de recyclage est affectée à la partie prenante : recycleur.

Dans ce chapitre, nous avons proposé une **méthodologie d'aide à la décision**, que nous avons appelée **MadOFR** (Méthodologie d'aide à la décision pour l'Organisation de la Filière de Reconditionnement). MadOFR est construite à travers les trois étapes suivantes :

1. Etat de l'art sur les applications 2nde vie ;
2. Identification de la structure de la filière de reconditionnement actuelle, si elle existe ;
3. Choix des structures potentielles de la filière de reconditionnement.

En enrichissant l'état de l'art pour la sélection des **critères de caractérisation** des applications 2nde vie, nous avons introduit des **critères de succès** permettant de juger la pertinence d'entreprendre l'activité de reconditionnement par une **partie prenante** donnée pour une **application donnée**.

L'originalité de la méthodologie est la prise en compte des aspects rationnels et irrationnels de la prise de décision, ce qui rend la démarche de prospective plus pertinente. Elle a aussi identifié les enjeux et questions qui se posent lors de l'analyse de l'organisation de la filière sur le périmètre de reconditionnement. Cela constitue une base pour d'autres perspectives d'analyses de modes d'organisation de cette filière ou d'autres filières similaires.

Conclusion et perspectives

Ce travail de recherche « *La filière de valorisation des batteries des véhicules électriques en fin de vie. Contribution à la modélisation d'un système organisationnel complexe en émergence* », a été effectué dans le cadre de la chaire de recherche « Armand Peugeot », en collaboration entre PSA Peugeot Citroën et le laboratoire de Génie Industriel de l'Ecole Centrale Paris. C'est un sujet à la croisée des sciences de l'ingénieur, des sciences économiques, des sciences de gestion et des sciences sociales, il a été défini pour répondre à des aspirations industrielles et académiques.

En définissant la filière de valorisation des batteries lithium-ion (BLI) des véhicules électriques (VE) comme un **système sociotechnique, complexe en émergence**, nous avons posé notre problématique et notre positionnement académique. Cela a abouti à la formulation de trois questions de recherche que nous rappelons :

1. Comment modéliser la filière de valorisation des BLIs comme un système organisationnel complexe en émergence ?
2. Comment faire de la prospective sur la filière de valorisation des BLIs ?
3. Comment analyser la gouvernance de la filière de valorisation des BLIs ?

Notre première contribution est un modèle de représentation de la filière, un travail approfondi tant sur le choix des méthodes de modélisation, que sur la construction du modèle lui-même. **Par conséquent, cette première contribution est double : méthodologique et pratique**. D'un point de vue méthodologique, le partitionnement, l'imbrication et la combinaison de méthodes est une originalité de ce travail, qui vient enrichir le champ de recherche sur les systèmes complexes. Le processus de modélisation que nous avons mis en œuvre pourra être transposé à un autre système sociotechnique, complexe en émergence. D'un point de vue pratique, notre modélisation a servi à l'étude de la filière d'un point de vue technico-économique, organisationnel et prospectif. Dans l'avenir, elle pourra être mobilisée pour intégrer dans l'étude de la filière d'autres points de vue (logistique, bilan environnemental, etc.).

Notre deuxième contribution est la construction des scénarios permettant la prospective sur l'évolution de la filière. La construction de ces scénarios est une originalité de ce travail de recherche : l'analyse de sensibilité pour l'identification des variables clés, le choix de la matrice SRI (Stanford Research Institute) et le choix des dynamiques d'évolution comme

dimensions de la matrice SRI. Par conséquent, la combinaison (Dynamique des Systèmes – Matrice SRI) peut être préconisée dans d'autres études prospectives. En simulant le modèles DS dans les différents scénarios, nous avons apporté des réponses à certaines questions posées par la littérature, notamment la disponibilité des matières pour l'électromobilité et l'effet de la valorisation sur le coût du cycle de vie global de la BLI.

Notre troisième contribution est une méthodologie d'aide la décision pour l'étude de la gouvernance de la filière, sur le périmètre de l'activité de reconditionnement. Notre contribution vient enrichir la littérature manquante sur ce sujet. Cette méthodologie que nous avons appelée MadOFR (Méthodologie d'aide à la décision pour l'Organisation de la Filière de Reconditionnement) a été inspirée de de la méthode MacPMR (Méthode d'Aide à la Conception de Produits Mécatroniques Remanufacturables). L'originalité de MadOFR est la prise en compte des aspects rationnels et irrationnels de la prise de décision, ce qui rend la démarche de prospective plus pertinente. Pour des raisons de contraintes objectives liées à un travail de thèse et compte tenu de la difficulté à disposer des données nécessaires pour MadOFR, nous n'avons pas pu montrer les résultats de son exploitation. Toutefois, nous avons fourni un exemple hypothétique à titre d'illustration. A terme, MadOFR pourra être mise en œuvre via un outil plus formel, en spécifiant les données nécessaires, les sources et manières de les requérir, comment les rentrer dans l'outil et quelles sont les types d'analyses qui en découlent.

Enfin, les contributions industrielles de notre travail se situent à deux niveaux. Le premier concerne la **compréhension des mécanismes** qui vont régir l'évolution de la filière de valorisation. A travers le modèle DS, nous avons identifié les dynamiques d'évolution, ainsi que les variables clés dans ces dernières. Le deuxième niveau concerne la mise à disposition de grilles de lecture pour les **futures configurations possibles** de cette filière. A travers SCOS'M, nous avons identifié les options et procédés de valorisation possibles. A travers la simulation du modèle DS dans différents scénarios, nous avons analysé ces options et procédés de valorisation ainsi que la criticité des matières. Enfin, à travers MadOFR, une méthodologie pour la réflexion sur les futures typologies de gouvernance de la filière est mise à disposition des futurs décideurs.

Concernant la criticité des matières, des inquiétudes sont exprimées quant à la maîtrise de l'approvisionnement des matières comme le cobalt, le lithium ou le graphite, nous avons montré que seule l'utilisation du cobalt est susceptible d'épuiser une grande partie des

réserve pour les besoins des BLIs. Le lithium ainsi que les autres matières ne présentent pas ce risque, même dans les scénarios de déploiement des VEs les plus optimistes.

Dans l'analyse des options et procédés de valorisation, nous avons conclu que le recyclage sera un centre de coûts pour le constructeur dans tous les cas, même avec l'utilisation maximale des unités de recyclage et la présence de matières intéressantes, comme le cobalt, le nickel et le cuivre. Nous rappelons les deux procédés de recyclage que nous avons identifiés :

- Procédé 1 : Démontage, traitement mécanique, traitement hydro-métallurgique
- Procédé 2 : Démontage, traitement pyrométallurgique, traitement hydro-métallurgique

Le premier apparaît comme le plus intéressant d'un point de vue technico-économique, puisque le second présente un investissement plus important lié à la pyrométallurgie, alors que les revenus de revente des matières recyclées sont équivalents dans les deux procédés.

Le reconditionnement, qui contrairement au recyclage n'est pas obligatoire, pourra être rentable dans l'avenir. Cependant, cette rentabilité est très sensible aux variables qui y interviennent, notamment le coût fixe et variable de reconditionnement et le prix des BLIs. Lorsque le reconditionnement est profitable, le coût de la fin de vie sera considérablement réduit, celui du cycle de vie global de la BLI le sera légèrement (moins de 11%).

Nous notons par ailleurs que le coût de transport impacte fortement le coût de recyclage et la marge de reconditionnement. Par conséquent, l'enjeu de la valorisation n'est pas d'abaisser le coût initial d'une BLI ou de générer un profit pour les constructeurs. Il s'agit plutôt de réduire le coût de cette phase au maximum, à travers les bonnes solutions de recyclage/réutilisation et l'optimisation de la logistique.

Limites et perspectives

Le travail présenté dans ce rapport est le fruit de trois années. Des hypothèses et positionnements ont été adoptés tout au long. Il convient de les rappeler ici.

- **Hypothèse (3.1)** : le remanufacturing des BLIs à leur fin de vie automobile n'est pas considéré dans ce travail. Les exigences en autonomie, fiabilité et sécurité rendent une telle démarche moins réaliste.
- **Hypothèse (3.2)** : Seulement deux procédés sont considérés dans ce travail. Il s'agit des procédés:
 - Procédé 1 : Démontage, traitement mécanique, traitement hydro-métallurgique

- Procédé 2 : Démontage, traitement pyrométallurgique, traitement hydro-métallurgique
- **Hypothèse (5.1)** : L'activité d'inspection/tri sera entreprise par l'une des parties prenantes : constructeur, recycleur ou reconditionneur.
- **Hypothèse (5.2)** : Les activités: collecte, transport pour reconditionnement et pour recyclage ainsi que la partie prenante logisticien sont soustraites de l'analyse.
- **Hypothèse (5.3)** : L'activité de recyclage est affectée à la partie prenante : Recycleur.

Deux hypothèses pour les aspects technico-économiques de la filière, et trois hypothèses pour les aspects organisationnels. Ainsi, les conclusions de notre travail dépendent de la véracité de ces hypothèses dans l'avenir.

En termes de perspectives, nous avons identifié **trois** perspectives majeures.

La première perspective est l'étude des aspects logistiques de la filière. Dans notre travail, nous avons choisi de ne pas considérer les aspects logistiques pour deux raisons : le niveau de maturité de la filière et notre concentration sur le système batterie (2.1.1). Cependant, nous l'avons vu dans l'évaluation du coût de recyclage (4.3.3), le transport est très impactant et il convient donc de l'optimiser. La suite serait de mettre en œuvre des **démarches de couplage simulation-optimisation**. Le but sera d'identifier la localisation des différentes unités de traitement en Europe, l'horizon de leurs implémentations et l'affectation des flux de fin de vie à ces unités.

La deuxième perspective est une extension du modèle de simulation DS afin d'inclure les aspects environnementaux. Au début de ce rapport, nous avons identifié quatre motivations pour la valorisation des BLIs : géostratégiques, réglementaires, économiques et environnementales. Nous avons répondu aux trois premières. La suite serait de modéliser le bilan environnemental des différentes options et procédés de valorisation. Cela permettra d'ajouter cette dimension environnementale à l'analyse technico-économique.

La troisième perspective a pour but une meilleure appréciation de la criticité géologique, puis globale des matières. Lors de l'analyse de la criticité géologique des matières, nous avons conclu que les autres secteurs industriels en sont les principaux contributeurs. Il convient donc de mieux modéliser cette demande globale. Nous avons également mentionné que la criticité géologique est un facteur parmi d'autres dans la criticité globale d'une matière. Une perspective serait de mettre en œuvre une démarche multicritères, prenant en compte

d'autres facteurs de risque, comme la concentration géographique et la situation politique des états.

Tout au long de cette thèse, nous nous sommes intéressés au sujet de la **valorisation des batteries lithium-ion des véhicules électriques**. Nous avons montré son intérêt dans un contexte d'épuisement de ressources, de réchauffement de la planète et de protection de la santé. En modélisant cette filière de valorisation complexe et émergente, nous avons établi une base d'analyse utile à l'aide à la décision. Notre travail de recherche ouvre la voie afin de continuer l'exploration de ce sujet pour d'autres fins, notamment sur les aspects logistiques et environnementaux.

Publications et communications

Actes de Conférences internationales

IDJIS, H., ATTIAS, D., RICHEL, S., BOCQUET, J.C., 2013. Designing a Sustainable Recycling Network for Batteries from Electric Vehicles : Development and Optimization of Scenarios. In Collaborative Systems for Reindustrialization. IFIP Advances in Information and Communication Technology, Vol. 408.

Conférences internationales avec comité de lecture

IDJIS, H., GHAFARI, A., 2013. Modeling sustainable recycling logistic network for batteries from electric vehicles in EU-27: A system dynamics approach. 4th Complex System Design & management conference. Paris.

Conférences internationales sans comité de lecture

IDJIS, H., GHAFARI, A., RICHEL, S., 2013. Towards sustainable recycling networks for batteries from electric vehicles in EU-27. A system dynamics approach modeling and analysis. 26th European conference on operational research. Rome.

IDJIS, H., ATTIAS, D., GHAFARI, A., RICHEL, S., BOCQUET, J.C., 2013. Recycling lithium batteries : a key issue for electro-mobility. 1st Armand Peugeot Chair conference "Electromobility: Challenging Issues". Paris.

IDJIS, H., ATTIAS, D., GHAFARI, A., RICHEL, S., BOCQUET, J.C., 2014. The recovery of lithium batteries analysis. 2nd Armand Peugeot Chair conference "Electromobility: Challenging Issues". Paris.

IDJIS, H., ATTIAS, D., GHAFARI, A., RICHEL, S., Bocquet, J.C., 2015. What are the options for Li-ion batteries after automotive use?. EVS28. Korea.

IDJIS, H., 2013. Recycling lithium batteries: a key issue for electro-mobility. 15th Young Energy Economists and Engineers Seminar (YEEES). Stockholm.

Workshops

IDJIS, H. Le recyclage des batteries au lithium & la transition électrique: Apports et défis. 2^{ème} workshop de la chaire Armand Peugeot. 25 juin 2013. ESSEC (Paris).

IDJIS, H. Recycling lithium batteries : a key issue for electro-mobility. Conférence annuelle de l'association des économistes de l'énergie: séminaire des étudiants. 26 novembre 2013. Représentation du Parlement Européen (Paris).

IDJIS, H. Characterization of Li-ion battery recovery and options assessment. 3^{ème} workshop de la chaire Armand Peugeot. 25 juin 2014. Supélec (Paris).

Rapports

Rapport de L'Office Parlementaire D'évaluation des Choix Scientifiques et Technologiques sur « Les nouvelles mobilités sereines et durables : concevoir et utiliser des véhicules écologiques ». N° 1713/293. 16 janvier 2014. p. 78.

Bibliographie :

- Achzet, B., Helbig, C., 2013. How to evaluate raw material supply risks—an overview. *Resources Policy* 38, 435–447.
- Ackermann, F., Eden, C., Williams, T., 1997. Modeling for Litigation: Mixing Qualitative and Quantitative Approaches. *Interfaces* 27, 48–65.
- Acosta, C., Idjis, H., 2014. State of the art of scenario planning: Proposal of a classification of scenario building existing methods according to use (Mémoire thématique). Ecole Centrale Paris.
- ADEME, 2013a. Economie circulaire: Notions. Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie.
- ADEME, 2013b. Piles et accumulateurs: Rapport annuel 2013. Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie.
- ADEME, 2013c. Élaboration selon les principes des ACV des bilans énergétiques, des émissions de gaz à effet de serre et des autres impacts environnementaux. Induits par l'ensemble des filières de véhicules électriques et de véhicules thermiques, VP de segment B (citadine polyvalente) et VUL à l'horizon 2012 et 2020. Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie.
- ADEME, 2012. Contribution de l'ADEME à l'élaboration de visions énergétiques 2030-2050. Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie.
- ADEME, 2011. Étude de la seconde vie des batteries de véhicules électriques et hybrides rechargeables. Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie.
- ADEME, 2009. Piles et accumulateurs: Rapport annuel 2009. Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie.
- Agrawal, S., Singh, R.K., Murtaza, Q., 2015. A literature review and perspectives in reverse logistics. *Resources, Conservation and Recycling* 97, 76–92.
- Ahmadi, L., Fowler, M., Young, S.B., Fraser, R.A., Gaffney, B., Walker, S.B., 2014a. Energy efficiency of Li-ion battery packs re-used in stationary power applications. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 8, 9–17.
- Ahmadi, L., Yip, A., Fowler, M., Young, S.B., Fraser, R.A., 2014b. Environmental feasibility of re-use of electric vehicle batteries. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 6, 64–74.
- Al-Alawi, B.M., Bradley, T.H., 2013. Review of hybrid, plug-in hybrid, and electric vehicle market modeling Studies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 21, 190–203.
- Amarakoon, S., Smith, J., Segal, B., 2013. Application of life-cycle assessment to nanoscale technology: lithium-ion batteries for electric vehicles.
- Amer, M., Daim, T.U., Jetter, A., 2013. A review of scenario planning. *Futures* 46, 23–40.
- Attias, D., Donada, C., 2012. Gestion de projet innovante dans le secteur automobile. Une étude des projets de PSA sur l'économie de l'électromobilité. Presented at the Conférence internationale en gestion de projet du DSG de l'UQTR, Québec.
- Avem, 2013. Seconde vie des batteries – BMW et Vattenfall lancent un programme de recherche [WWW Document]. URL <http://www.avem.fr/actualite-seconde-vie-des-batteries-bmw-et-vattenfall-lancent-un-programme-de-recherche-4346.html> (accessed 9.30.14).
- Avere, 2014. Voiture et véhicule électrique - France mobilité électrique [WWW Document]. URL <http://www.france-mobilite-electrique.org/>
- Avicenne Energy, 2014. xEV Market 2014-2025. Impact on the battery business. Presented at the EEVC, Brussels.
- Avicenne Energy, 2013. Worldwide Rechargeable Battery Market 2012-2025.

- Beer, S., 1995. Diagnosing the system for organizations, 1 edition. ed. Wiley, Chichester.
- Beer, S., 1981. Brain of the firm, 2 edition. ed. Wiley, Chichester, England; New York.
- Bertalanffy, L. von, 1973. Théorie générale des systèmes. Dunod, Paris.
- Bishop, P., Hines, A., Collins, T., 2007. The current state of scenario development: an overview of techniques. *foresight* 9, 5–25.
- Bocquet, J.-C., Patay, E., Schindler, A., Duzert, A., 2007. How to build a design product and its end-product system? An original approach called SCOS'. Presented at the International Conference on Engineering Design (ICED 07), p. ??
- Boston Consulting Group, 2009. The comeback of the electric car? - How real, how soon, and What must happen next.
- Boutillier, M., Labye, A., Lagoutte, C., Lévy, N., Oheix, V., 2002. Financement et gouvernement des entreprises. *Revue d'économie politique* Vol. 112, 499–544.
- Buchert, M., Jenseit, W., Merz, C., Schüler, D., 2011. Verbundprojekt: Entwicklung eines realisierbaren Recyclingkonzepts für die Hochleistungsbatterien zukünftiger Elektrofahrzeuge – LiBri: Teilprojekt: LCA der Recyclingverfahren.
- Bustamante, M.L., Gaustad, G., Goe, M., 2014. Criticality Research in the Materials Community. *JOM* 66, 2340–2342.
- Capgemini, 2012. Managing the Change to e-Mobility / Capgemini Automotive Study 2012. Capgemini.
- Caumon, P., 2011. Batteries de véhicule électrique: en route pour une seconde vie stationnaire. Ambassade de France à Washington Mission pour la Science et la Technologie, Washington.
- CEC, 2006. Keep Europe moving - Sustainable mobility for our continent - Mid-term review of the European Commission's 2001 Transport White paper. Commission of the European Communities, Brussels.
- CGDD, 2014. Chiffres clés de l'énergie. Edition 2013. Commissariat Général au Développement Durable.
- Chaerul, M., Tanaka, M., Shekdar, A.V., 2008. A system dynamics approach for hospital waste management. *Waste Management* 28, 442–449.
- Chalk, S.G., Miller, J.F., 2006. Key challenges and recent progress in batteries, fuel cells, and hydrogen storage for clean energy systems. *Journal of Power Sources* 159, 73–80.
- Charue-Duboc, F., Midler, C., 2011. Quand les enjeux environnementaux créent des innovations stratégiques. *Revue Française de Gestion* vol. 37, pp.107–122.
- Checkland, P., 1978. The origins and nature of “hard” systems thinking. *Journal of Applied system Analysis* 5, 99–110.
- Chen, M.-H., 2010. Understanding world metals prices—Returns, volatility and diversification. *Resources Policy* 35, 127–140. doi:10.1016/j.resourpol.2010.01.001
- Chen, T.-H., Hsieh, T.-Y., Yang, N.-C., Yang, J.-S., Liao, C.-J., 2013. Evaluation of advantages of an energy storage system using recycled EV batteries. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 45, 264–270.
- Chen, X., Chen, Y., Zhou, T., Liu, D., Hu, H., Fan, S., 2015. Hydrometallurgical recovery of metal values from sulfuric acid leaching liquor of spent lithium-ion batteries. *Waste Management* 38, 349–356.
- Churchman, C.W., 1979. The systems approach and its enemies. Basic Books.
- Cluzel, F., 2012. Eco-design implementation for complex industrial system : From scenario-based LCA to the definition of an eco-innovative R&D projects portfolio (Thèse de doctorat). Ecole Centrale Paris.
- Coase, R.H., 1937. The nature of the firm. *Economica* 4, 386–405.

- Codani, P., Petit, M., Perez, Y., 2014. Diversity of transmission system operators for Grid Integrated Vehicles. Presented at the European Energy Market (EEM), 2014 11th International Conference on the, IEEE, pp. 1–5.
- Commission économique pour l'Europe, 1985. Accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par route (ADR).
- Conceição, P., Marone, H., 2008. Characterizing the 21st century first commodity boom: Drivers and impact. Office of Development Studies, United Nations Development Programme, Nueva York. EL TRIMESTRE ECONÓMICO 102.
- Cready, E., Lippert, J., Pihl, J., Weinstock, I., Symons, P., 2003. Technical and economic feasibility of applying used EV batteries in stationary applications (No. SAND2002-4084). Sandia National Labs., Albuquerque, NM (US); Sandia National Labs., Livermore, CA (US).
- Davidz, H.L., 2006. Enabling systems thinking to accelerate the development of senior systems engineers (Thesis). Massachusetts Institute of Technology.
- De Brito, M., Dekker, R., Flapper, S., 2003. Reverse Logistics - a Review of Case Studies (SSRN Scholarly Paper No. ID 411649). Social Science Research Network, Rochester, NY.
- Dijk, M., Orsato, R.J., Kemp, R., 2013. The emergence of an electric mobility trajectory. Energy Policy, Special Section: Transition Pathways to a Low Carbon Economy 52, 135–145.
- Dobbs, R., Oppenheim, J., Thompson, F., Brinkman, M., Zornes, M., 2011. Resource revolution: Meeting the world's energy, materials, food, and water needs. McKinsey Global Institute.
- Donnadiou, G., Karsky, M., 2002. La systémique, penser et agir dans la complexité. Liaisons.
- Dugast, A., 2013. Panorama des stockeurs d'énergie électrique. ESSEC-Paris
- Dunn, J.B., Gaines, L., Sullivan, J., Wang, M.Q., 2012. Impact of recycling on cradle-to-gate energy consumption and greenhouse gas emissions of automotive lithium-ion batteries. Environmental Science & Technology 46, 12704–12710.
- Durand, D., 2013. La systémique. Presses universitaires de France, Paris, France.
- Eden, C., 2004. Analyzing cognitive maps to help structure issues or problems. European Journal of Operational Research 159, 673–686.
- Eden, C., 1994. Cognitive mapping and problem structuring for system dynamics model building. System Dynamics Review 10, 257–276.
- Edmonds, B., 1999. Syntactic Measures of Complexity. University of Manchester, Manchester, UK.
- EEA, 2015. Global search on data, maps and indicators — European Environment Agency (EEA) [WWW Document]. URL http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/find#c1=Graph&c1=Map&b_start=0&c6=transport (accessed 4.14.15).
- ELIBAMA, 2014. Electrodes and cells manufacturing white paper. ELIBAMA.
- El korchi, A., 2010. Conditions stratégiques d'émergence d'une reverse supply chain à des fins de remanufacturing chez le fabricant d'origine (Thèse de doctorat). Centre de recherche en transport et logistique, Aix-en-Provence, Bouches-du-Rhône, France.
- El korchi, A., Millet, D., 2011. Designing a sustainable reverse logistics channel: the 18 generic structures framework. Journal of Cleaner Production 19, 588–597.
- Ergin, N., 2012. Preface to Part I Complex System. Procedia Computer Science, Complex Adaptive Systems 2012 12, 11–12.
- Espejo, R., Reyes, A., 2011. Organizational systems: Managing complexity with the Viable System Model. Springer Science & Business Media.
- European Commission, 2014a. Statistical pocketbook 2014 - Transport. European Commission.

- European Commission, 2014b. Regulation (EU) No 333/2014 of the European Parliament and of the Council of 11 March 2014 amending Regulation (EC) No 443/2009 to define the modalities for reaching the 2020 target to reduce CO₂ emissions from new passenger cars.
- European Commission, 2011a. Communication from the commission to the European parliament, the council, the European economic and social committee and the committee of the regions. A roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050. European Commission, Brussels.
- European Commission, 2011b. White Paper on Transport: towards a competitive and resource efficient transport system.
- European Commission, 2010. EU energy and transport in figures Statistical pocketbook 2010. European Commission Directorate-General for Energy and Transport, Luxembourg.
- European Commission, 2009. Regulation (EC) No 443/2009 of 23 April 2009 setting emission performance standards for new passenger cars as part of the Community's integrated approach to reduce CO₂ emissions from light-duty vehicles.
- European Commission, 2006. Directive 2006/66/EC of the European parliament and of the council of 6 September 2006 on batteries and accumulators and waste batteries and accumulators and repealing Directive 91/157/EEC.
- Fabry, B., 2015. Nissan Leaf - Combien coûte le changement de batterie en France ? [WWW Document]. Automobile Propre. URL <http://www.automobile-propre.com/breves/nissan-leaf-combien-coute-changement-batterie-france/> (accessed 8.13.15).
- Farel, R., Yannou, B., Ghaffari, A., Leroy, Y., 2013. A cost and benefit analysis of future end-of-life vehicle glazing recycling in France: A systematic approach. *Resources, Conservation and Recycling* 74, 54–65.
- Fleischmann, M., Bloemhof-Ruwaard, J.M., Dekker, R., Van der Laan, E., Van Nunen, J.A., Van Wassenhove, L.N., 1997. Quantitative models for reverse logistics: A review. *European journal of operational research* 103, 1–17.
- Fleischmann, M., Krikke, H.R., Dekker, R., Flapper, S.D.P., 2000. A characterisation of logistics networks for product recovery. *Omega* 28, 653–666.
- Flood, R.L., Jackson, M.C., 1991. Creative problem solving: Total Systems Intervention. John Wiley & Sons, Chichester; New York.
- Forrester, J.W., 1961. *Industrial dynamics*. M.I.T. Press.
- Fournier, G., Hinderer, H., Schmid, D., Seign, R., Baumann, M., 2012. The new mobility paradigm: transformation of value chain and business models.
- Frost & Sullivan, 2010. Global electric vehicles lithium-ion battery second life and recycling market analysis. Frost & Sullivan.
- Funtowicz, S., Ravetz, J.R., 1994. Emergent complex systems. *Futures, Special Issue Complexity: Fad or Future?* 26, 568–582.
- Gaines, L., 2012. To recycle, or not to recycle, that is the question: Insights from life-cycle analysis. *MRS Bull.* 37, 333–338.
- Gaines, L., Sullivan, J., Burnham, A., Belharouak, I., 2011. Life-cycle analysis of production and recycling of lithium ion batteries. *Transp. Res. Record* 2252, 57–65.
- Ganter, M.J., Landi, B.J., Babbitt, C.W., Anctil, A., Gaustad, G., 2014. Cathode refunctionalization as a lithium ion battery recycling alternative. *Journal of Power Sources* 256, 274–280.
- Gaucheron, T., 2000. Intégration du recyclage en conception le modèle produit : un outil descriptif et cognitif dans le processus de prise en compte du recyclage. INP Grenoble.
- Geels, F.W., Schot, J., 2007. Typology of sociotechnical transition pathways. *Research Policy* 36, 399–417.

- Georgiadis, P., 2013. An integrated System Dynamics model for strategic capacity planning in closed-loop recycling networks: A dynamic analysis for the paper industry. *Simulation Modelling Practice and Theory* 32, 116–137.
- Georgi-Maschler, T., Friedrich, B., Weyhe, R., Heegn, H., Rutz, M., 2012. Development of a recycling process for Li-ion batteries. *Journal of Power Sources* 207, 173–182.
- Georgiou, I., 2003. The idea of emergent property. *Journal of the Operational Research Society* 54, 239–247.
- Gherzi, F., McDonnell, S., 2007. The impacts of long-term CO₂ objectives on short-term transportation trends in the European Union. *Energy for Sustainable Development* 11, 33–43.
- Goudenege, G., 2013. Développement de modèles d'optimisation de flux en reverse logistique - Applications aux contenants réutilisables (Thèse de doctorat). Ecole Centrale Paris, Paris.
- Govindan, K., Soleimani, H., Kannan, D., 2015. Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future. *European Journal of Operational Research* 240, 603–626.
- Gratz, E., Sa, Q., Apelian, D., Wang, Y., 2014. A closed loop process for recycling spent lithium ion batteries. *Journal of Power Sources* 262, 255–262.
- Grosjean, C., Miranda, P.H., Perrin, M., Poggi, P., 2012. Assessment of world lithium resources and consequences of their geographic distribution on the expected development of the electric vehicle industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, 1735–1744.
- Gruber, P.W., Medina, P.A., Keoleian, G.A., Kesler, S.E., Everson, M.P., Wallington, T.J., 2011. Global lithium availability. *Journal of Industrial Ecology* 15, 760–775.
- Harper, E.M., Kavlak, G., Graedel, T.E., 2012. Tracking the metal of the goblins: Cobalt's cycle of use. *Environ. Sci. Technol.* 46, 1079–1086.
- Hein, R., Kleindorfer, P.R., Spinler, S., 2012. Valuation of electric vehicle batteries in vehicle-to-grid and battery-to-grid systems. *Technological Forecasting and Social Change* 79, 1654–1671.
- Herrmann, C., Raatz, A., Andrew, S., Schmitt, J., 2014. Scenario-based development of disassembly systems for automotive lithium ion battery systems. *Advanced Materials Research* 907, 391–401.
- Heymans, C., Walker, S.B., Young, S.B., Fowler, M., 2014. Economic analysis of second use electric vehicle batteries for residential energy storage and load-leveling. *Energy Policy* 71, 22–30.
- Hoyer, C., Kieckhäfer, K., Spengler, T.S., 2014. Technology and capacity planning for the recycling of lithium-ion electric vehicle batteries in Germany. *Journal of Business Economics*.
- Hoyer, C., Kieckhäfer, K., Spengler, T.S., 2013. Impact of mandatory rates on the recycling of lithium-ion batteries from electric vehicles in Germany, in: Nee, A.Y.C., Song, B., Ong, S.-K. (Eds.), *Re-Engineering Manufacturing for Sustainability*. Springer Singapore, pp. 543–548.
- Hoyer, C., Kieckhäfer, K., Spengler, T.S., 2011. A strategic framework for the design of recycling networks for lithium-ion batteries from electric vehicles, in: Hesselbach, J., Herrmann, C. (Eds.), *Glocalised Solutions for Sustainability in Manufacturing*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 79–84.
- Humphreys, D., 2010. The great metals boom: A retrospective. *Resources Policy* 35, 1–13.
- IEA, 2015. *Energy Technology Perspectives 2015- Mobilising Innovation to Accelerate Climate Action*. International Energy Agency, Paris.

- IEA, 2014. Energy Technology Perspectives 2014 - Harnessing Electricity's Potential. International Energy Agency, Paris.
- IEA, 2013. Global EV Outlook. OECD/IEA, Paris.
- IEA, 2012a. Energy Technology Perspectives 2012: Pathways to a Clean Energy System. International Energy Agency, Paris.
- IEA, 2012b. World Energy Outlook 2012. OECD/IEA, Paris.
- IEA, 2011. Technology roadmap, electric and plug-in hybrid electric 28 vehicles. International Energy Agency.
- Jackson, M.C., 1999. Towards Coherent Pluralism in Management Science. *The Journal of the Operational Research Society* 50, 12.
- Jackson, M.C., 1991. The origins and nature of critical systems thinking. *Systems Practice* 4, 131–149.
- Jackson, M.C., 1985. Social systems theory and practice: The need for a critical approach. *International Journal of General Systems* 10, 135–151.
- J.D. Power and Associates, 2010. Drive Green 2020: More Hope than Reality ?
- Jobin, P., Yamaguchi, J., Balter, G., Ceraso, C.J., Chan, A., Eggers, D., Ellinghorst, A., Flannery, M., McNulty, J.P., Pearson, S., Pitzer, J.W., 2009. Electric Vehicles, Global Equity Research Energy Technology / Auto Parts & Equipment. Credit Suisse.
- Joulié, M., Laucournet, R., Billy, E., 2014. Hydrometallurgical process for the recovery of high value metals from spent lithium nickel cobalt aluminum oxide based lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources* 247, 551–555.
- Kalhammer, F., Kamath, H., Duvall, M., Alexander, M., Jungers, B., 2009. Plug-in hybrid electric vehicles: Promise, issues and prospects. Presented at the EVS24 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium, Norway, pp. 1–11.
- Kampman, B., van Essen, H., Braat, W., Grünig, M., Kantamaneni, R., Gabel, E., 2011. Impacts of Electric Vehicles - Deliverable 5. CE Delft, Delft.
- Kempton, W., Perez, Y., Petit, M., 2014. Public Policy for Electric Vehicles and for Vehicle to Grid Power (SSRN Scholarly Paper No. ID 2487800). Social Science Research Network, Rochester, NY.
- Khan, S., Khan, F., Zhang, B., 2012. Reverse e-Logistics for SMEs in Pakistan, in: Wu, Y. (Ed.), *Software Engineering and Knowledge Engineering: Theory and Practice*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 229–237.
- Kieckhäfer, K., Hoyer, C., Spengler, T.S., 2013. Technology and capacity planning for the recycling of lithium-ion electric vehicle batteries in Germany. Presented at the 1st International Conference “Electromobility: Challenging Issues,” Paris, France.
- Kushnir, D., Sandén, B.A., 2012. The time dimension and lithium resource constraints for electric vehicles. *Resources Policy* 37, 93–103.
- Kwade, A., 2010. On the way to an “intelligent” recycling of traction batteries. Presented at the 7th Braunschweiger Symposium on Hybrid, Electric Vehicles and Energy Management, Braunschweig.
- Lamp, P., 2013. Anforderungen an Batterien für die Elektromobilität, in: Korthauer, R. (Ed.), *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 393–415.
- La Presse, 2012. Une deuxième vie pour les vieilles batteries des Volt | Denis Arcand | Chevrolet [WWW Document]. La Presse. URL <http://auto.lapresse.ca/actualites/chevrolet/201211/22/01-4596645-une-deuxieme-vie-pour-les-vieilles-batteries-des-volt.php> (accessed 9.30.14).
- Lee, S.S., Kim, T.H., Hu, S.J., Cai, W.W., Abell, J.A., 2010. Joining Technologies for Automotive Lithium-Ion Battery Manufacturing: A Review 541–549.
- Le Moigne, J.-L., 1990. *Systémique et complexité*. Dunod, Paris.
- Le Moigne, J.-L., 1999. *La modélisation des systèmes complexes*. Dunod.

- Le Moigne, J.-L.L., 1995. Modelling complex systems: Wonderful but not incomprehensible. *British Homoeopathic journal* 84, 164–165.
- Le Moigne, J.-L.L., 1994. *La théorie du système général : Théorie de la modélisation*. Presses Universitaires de France - PUF, Paris.
- Li, L., Dunn, J.B., Zhang, X.X., Gaines, L., Chen, R.J., Wu, F., Amine, K., 2013. Recovery of metals from spent lithium-ion batteries with organic acids as leaching reagents and environmental assessment. *Journal of Power Sources* 233, 180–189.
- Lin, B., Xie, C., 2014. Reduction potential of CO₂ emissions in China's transport industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 33, 689–700.
- Lux Research, 2015. *Crossing the Line: Li-ion Battery Cost Reduction and Its Effect on Vehicles and Stationary Storage*. Lux Research.
- Mathieux, F., 2002. *Contribution à l'intégration de la valorisation en fin de vie dès la conception d'un produit. Une méthode basée sur l'évaluation multicritères de la recyclabilité du produit et sur l'identification de ses points faibles de conception (Thèse de doctorat)*. Arts et Métiers ParisTech.
- Maudet-Charbuillet, C., 2009. *Proposition d'outils et démarches pour l'intégration de filières de recyclage de matières plastiques dans la "supply chain" automobile. (Thèse de doctorat)*. Arts et Métiers ParisTech.
- McKinsey and Company, 2010. *Portfolio of Power-trains for Europe: A Fact-Based Analysis*.
- Midgley, G., 2000. *Systemic Intervention: Philosophy, Methodology, and Practice, Contemporary Systems Thinking*. Springer US, Boston, MA.
- Miedema, J.H., Moll, H.C., 2013. Lithium availability in the EU27 for battery-driven vehicles: The impact of recycling and substitution on the confrontation between supply and demand until 2050. *Resources Policy* 38, 204–211.
- Mingers, J., 2000a. What is it to be critical? Teaching a critical approach to management undergraduates. *Management Learning* 31, 219–237.
- Mingers, J., 2000b. Variety is the spice of life: combining soft and hard OR/MS methods. *International Transactions in Operational Research* 7, 673–691.
- Mingers, J., 1984. Subjectivism and soft systems methodology-A critique. *Journal of Applied Systems Analysis* 11, 85–104.
- Mingers, J., Brocklesby, J., 1997. Multimethodology: Towards a framework for mixing methodologies. *Omega* 25, 489–509.
- Mingers, J., Gill, A. (Eds.), 1997. *Multimethodology: The Theory and Practice of Combining Management Science Methodologies*, 1 edition. ed. Wiley, Chichester.
- Mingers, J., Rosenhead, J., 2004. Problem structuring methods in action. *European Journal of Operational Research, Applications of Soft O.R. Methods* 152, 530–554.
- Mingers, J., White, L., 2010. A review of the recent contribution of systems thinking to operational research and management science. *European Journal of Operational Research* 207, 1147–1161.
- Möller, K.-C., 2013. Übersicht über die Speichersysteme/Batteriesysteme, in: Korthauer, R. (Ed.), *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 3–9.
- Morin, E., 1977. *La méthode, tome 1 : La Nature de la nature*. Seuil, Paris.
- Neubauer, J., Pesaran, A., 2011. The ability of battery second use strategies to impact plug-in electric vehicle prices and serve utility energy storage applications. *Journal of Power Sources* 196, 10351–10358.
- Neubauer, J., Pesaran, A., 2010. *PHEV/EV Li-Ion Battery Second-Use Project*.
- Neubauer, J., Pesaran, A., Bae, C., Elder, R., Cunningham, B., 2014. Updating United States Advanced Battery Consortium and Department of Energy battery technology targets for battery electric vehicles. *Journal of Power Sources* 271, 614–621.

- Neubauer, J.S., Pesaran, A., 2013. A techno-economic analysis of BEV service providers offering battery swapping services (SAE Technical Paper No. 2013-01-0500). SAE International, Warrendale, PA.
- Neubauer, J.S., Pesaran, A., Williams, B., Ferry, M., Eyer, J., 2012. A techno-economic analysis of PEV battery second use: Repurposed-battery selling price and commercial and industrial end-user value (SAE Technical Paper No. 2012-01-0349). SAE International, Warrendale, PA.
- Nissan, 2014. Harvesting a solar farm [WWW Document]. Nissan Online Newsroom. URL <http://nissannews.com/en-US/nissan/usa/releases/harvesting-a-solar-farm> (accessed 9.30.14).
- Notter, D.A., Gauch, M., Widmer, R., Wäger, P., Stamp, A., Zah, R., Althaus, H.-J., 2010. Contribution of Li-Ion Batteries to the Environmental Impact of Electric Vehicles. *Environ. Sci. Technol.* 44, 6550–6556.
- Novinsky, P., Glöser, S., Kühn, A., Walz, R., 2014. Modeling the feedback of battery raw material shortages on the technological development of lithium-ion-batteries and the diffusion of alternative automotive drives, in: 32nd International Conference of the System Dynamics Society 2014. p. 17.
- Ogilvy, J., Schwartz, P., 2004. Plotting your scenarios.
- Pasaoglu, G., Honselaar, M., Thiel, C., 2012. Potential vehicle fleet CO2 reductions and cost implications for various vehicle technology deployment scenarios in Europe. *Energy Policy* 40, 404–421.
- Patay, E., 2008. Déploiement de la chaîne logistique de l'hydrogène pour le marché des carburants en 2050: conception et développement d'un outil d'aide à la décision pour l'analyse de scénarios (Thèse de doctorat). École centrale Paris, France.
- Patay, E., Bocquet, J.-C., Duzert, A., 2007. Systemics for the Design of Complex Distribution Networks with uncertainties, in: Proceedings of the International Conference on Engineering Design. Presented at the International Conference on Engineering Design (ICED 07).
- Paucar-Caceres, A., 2010. Mapping the changes in management science: A review of “soft” OR/MS articles published in Omega (1973–2008). *Omega* 38, 46–56.
- Pearce, D.W., Turner, R.K., 1990. Economics of natural resources and the environment. JHU Press.
- Pélata, P., Matheu, M., Midler, C., Hirtzman, P., 2010. Le véhicule électrique va-t-il enfin démarrer? *Le journal de l'école de Paris du management* 84, 14–23.
- Perron, S.Y.T., 2002. Contributions au soutien logistique intégré des systèmes industriels: application à la ligne d'intégration laser (Thèse de doctorat). Laboratoire génie industriel, Châtenay-Malabry, Hauts de Seine, France.
- Pidd, M. (Ed.), 2004a. Systems Modelling: Theory and Practice. Wiley, Chichester.
- Pidd, M. (Ed.), 2004b. Complementarity in systems modelling, in: Systems Modelling: Theory and Practice. Wiley, Chichester.
- Pluchet, J., Destruel, P., 2010. Etat de la R&D dans le domaine des batteries pour véhicules électriques au Japon. Ambassade de France au Japon, Japon.
- Pollet, B.G., Staffell, I., Shang, J.L., 2012. Current status of hybrid, battery and fuel cell electric vehicles: From electrochemistry to market prospects. *Electrochimica Acta* 84, 235–249.
- Radetzki, M., 2006. The anatomy of three commodity booms. *Resources Policy* 31, 56–64.
- Radetzki, M., Eggert, R.G., Lagos, G., Lima, M., Tilton, J.E., 2008. The boom in mineral markets: How long might it last? *Resources Policy* 33, 125–128.
- Ramoni, M.O., Zhang, H.-C., 2013. End-of-life (EOL) issues and options for electric vehicle batteries. *Clean Techn Environ Policy* 15, 881–891.

- Reiner, R., Cartalos, O., Evrigenis, A., Viljamaa, K., 2010. Directorate general for internal policies: challenges for a European market for electric vehicles. European Parliament, Brussels.
- Richa, K., Babbitt, C.W., Gaustad, G., Wang, X., 2014. A future perspective on lithium-ion battery waste flows from electric vehicles. *Resources, Conservation and Recycling* 83, 63–76.
- Rogers, D.S., Tibben-Lembke, R.S., 1999. Going backwards: reverse logistics trends and practices. Reverse Logistics Executive Council, University of Nevada, Reno Center for Logistics Management.
- Roland Berger Strategy Consultants, 2010. Power train 2020 Li-ion Batteries—The Next Bubble Ahead ?
- Rosenhead, J., Mingers, J., 2001. Rational Analysis for a Problematic World Revisited: Problem Structuring Methods for Complexity, Uncertainty and Conflict, 2nd Edition. ed. John Wiley & Sons.
- Salvi, B.L., Subramanian, K.A., Panwar, N.L., 2013. Alternative fuels for transportation vehicles: A technical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 25, 404–419.
- Sandén, B., 2013. Systems Perspectives on Electromobility. Chalmers University of Technology.
- Sangwan, K.S., Jindal, A., 2013. An integrated fuzzy multi-criteria evaluation of lithium-ion battery recycling processes. *International Journal of Sustainable Engineering* 6, 359–371.
- Sathre, R., Scown, C.D., Kavvada, O., Hendrickson, T.P., 2015. Energy and climate effects of second-life use of electric vehicle batteries in California through 2050. *Journal of Power Sources* 288, 82–91.
- Senge, P.M., 1990. *The Fifth Discipline: The Art & Practice of The Learning Organization*. New York.
- Simon, H.A., 1955. A behavioral model of rational choice. *The Quarterly Journal of Economics* 69, 99–118.
- Soares, F.J., Almeida, P.M.R., Lopes, J.A.P., Garcia-Valle, R., Marra, F., 2013. State of the art on different types of electric vehicles, in: Garcia-Valle, R., Lopes, J.A.P. (Eds.), *Electric Vehicle Integration into Modern Power Networks, Power Electronics and Power Systems*. Springer New York, pp. 1–13.
- Srivastava, S.K., 2008. Network design for reverse logistics. *Omega* 36, 535–548.
- Sterman, J., 2000. *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. Irwin/McGraw-Hill, New York.
- Sterman, J.D., 1991. A skeptic's guide to computer models, in: Barney GO, Kreutzer WB, Garrett MJ, Editors. *Managing a Nation: The Microcomputer Software Catalog*. Westview Press.
- Sturgeon, T.J., 2001. How do we define value Chains and production Networks? *IDS Bulletin* 32, 9–18.
- Swart, P., Dewulf, J., Biernaux, A., 2014. Resource demand for the production of different cathode materials for lithium ion batteries. *Journal of Cleaner Production* 84, 391–399.
- Tankersley, J., 2006. Ten tips for creating more powerful future stories. *FUTUREtakes* 5.
- Tchertchian, N., 2013. Etude des approches méthodologiques pour l'amélioration environnementale des performances en conception de systèmes complexes (Thèse de doctorat). Ecole Centrale Paris.
- Tchertchian, N., Millet, D., El korchi, A., 2010. A method helping to define eco-innovative systems (Product Architecture Reverse Supply Chain structure Use Cycles Scenario). Presented at the 17th CIRP Conference on Life Cycle Engineering, China.

- Tong, S.J., Same, A., Kootstra, M.A., Park, J.W., 2013. Off-grid photovoltaic vehicle charge using second life lithium batteries: An experimental and numerical investigation. *Applied Energy* 104, 740–750.
- Torchio, M.F., Santarelli, M.G., 2010. Energy, environmental and economic comparison of different powertrain/fuel options using well-to-wheels assessment, energy and external costs – European market analysis. *Energy* 35, 4156–4171.
- Törkler, A., 2014. Electrodes and cells manufacturing white paper: Batteries Refurbishing & Reuse. ELIBAMA.
- Ulrich, W., 1983. Critical heuristics of social planning: A new approach to practical philosophy. Haupt, Bern.
- Umicore, 2010. The UMICORE Process: Recycling of Li-ion and NiMH batteries via a unique industrial Closed Loop.
- USABC, 2015. USCAR: Energy Storage System Goals [WWW Document]. URL http://www.uscar.org/guest/article_view.php?articles_id=85 (accessed 11.3.14).
- USGS, 2015. Mineral Commodity Summaries 2015. U.S. Geological Survey.
- USGS, 2014. Mineral Commodity Summaries 2014. U.S. Geological Survey.
- USGS, 2013. Mineral Commodity Summaries 2013. U.S. Geological Survey.
- USGS, 2012. Mineral Commodity Summaries 2012. U.S. Geological Survey.
- USGS, 2011. Mineral Commodity Summaries 2011. U.S. Geological Survey.
- USGS, 2010. Mineral Commodity Summaries 2010. U.S. Geological Survey.
- Valckenaers, P., Van Brussel, H., Hadeli, Bochmann, O., Saint Germain, B., Zamfirescu, C., 2003. On the design of emergent systems: an investigation of integration and interoperability issues. *Engineering Applications of Artificial Intelligence, Intelligent Manufacturing* 16, 377–393.
- Väyrynen, A., Salminen, J., 2012. Lithium ion battery production. *The Journal of Chemical Thermodynamics, Thermodynamics of Sustainable Processes* 46, 80–85.
- Vikström, H., Davidsson, S., Höök, M., 2013. Lithium availability and future production outlooks. *Applied Energy* 110, 252–266.
- Wang, X., Gaustad, G., Babbitt, C.W., Bailey, C., Ganter, M.J., Landi, B.J., 2014a. Economic and environmental characterization of an evolving Li-ion battery waste stream. *Journal of Environmental Management* 135, 126–134.
- Wang, X., Gaustad, G., Babbitt, C.W., Richa, K., 2014b. Economies of scale for future lithium-ion battery recycling infrastructure. *Resources, Conservation and Recycling* 83, 53–62.
- WEC, 2013. World Energy Trilemma 2013: Time to get real – the case for sustainable energy investment. World Energy Council.
- Wehicles, 2014. Des batteries d'hybrides Toyota reconverties par un concessionnaire [WWW Document]. URL <https://wehicles.com>. URL https://wehicles.com/news/Des_batteries_d_hybrides_Toyota_reconverties_par_un_concessionnaire-1405027063.html (accessed 9.30.14).
- Weyrich, M., Natkunarajah, N., 2013. Institut für Automatisierungs- und Softwaretechnik. Presented at the 22nd International Conference on Production Research (ICPR), Brésil.
- Williamson, O.E., 2000. The new institutional economics: Taking stock, looking ahead. *Journal of Economic Literature* 38, 595–613.
- World Bank, IEA, 2013. Sustainable Energy for (SE4ALL): Global Tracking Framework. International Energy Agency, World Bank.
- Xerfi, 2014. Le marché des piles et batteries. Xerfi.

- Xu, J., Thomas, H.R., Francis, R.W., Lum, K.R., Wang, J., Liang, B., 2008. A review of processes and technologies for the recycling of lithium-ion secondary batteries. *Journal of Power Sources* 177, 512–527.
- Yaksic, A., Tilton, J.E., 2009. Using the cumulative availability curve to assess the threat of mineral depletion: The case of lithium. *Resources Policy* 34, 185–194.
- Zeng, X., Li, J., Singh, N., 2013. Recycling of spent lithium-ion battery: A critical review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 44, 1129–1165.
- Zetsche, D., 2010. The future of electric cars — the automotive industry perspective.
- Zhang, X., Cao, H., Xie, Y., Ning, P., An, H., You, H., Nawaz, F., 2015. A closed-loop process for recycling $\text{LiNi}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$ from the cathode scraps of lithium-ion batteries: Process optimization and kinetics analysis. *Separation and Purification Technology* 150, 186–195.
- Zhang, X., Xie, Y., Lin, X., Li, H., Cao, H., 2013. An overview on the processes and technologies for recycling cathodic active materials from spent lithium-ion batteries. *J Mater Cycles Waste Manag* 15, 420–430.
- Zhao, W., Ren, H., Rotter, V.S., 2011. A system dynamics model for evaluating the alternative of type in construction and demolition waste recycling center – The case of Chongqing, China. *Resources, Conservation and Recycling* 55, 933–944.
- Zubaryeva, A., Thiel, C., Barbone, E., Mercier, A., 2012. Assessing factors for the identification of potential lead markets for electrified vehicles in Europe: expert opinion elicitation. *Technological Forecasting and Social Change* 79, 1622–1637.

A. Annexes chapitre 1 (Contexte)

A.1 Technologies BLI pour VE

Dans la plupart des VEs commercialisés aujourd'hui, on retrouve principalement les quatre technologies : LMO (LiMn_2O_4), LFP (LiFePO_4), NMC ($\text{Li}(\text{Ni}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z)\text{O}_2$) et NCA ($\text{LiNi}_{0,8}\text{Co}_{0,15}\text{Al}_{0,05}\text{O}_2$). Ces technologies sont considérées comme celles de référence dans le futur (Avicenne Energy, 2013; Lamp, 2013; Möller, 2013). Elles sont comparées dans la figure suivante selon les critères: coût, densité énergétique, durée de vie, sécurité et densité de puissance.

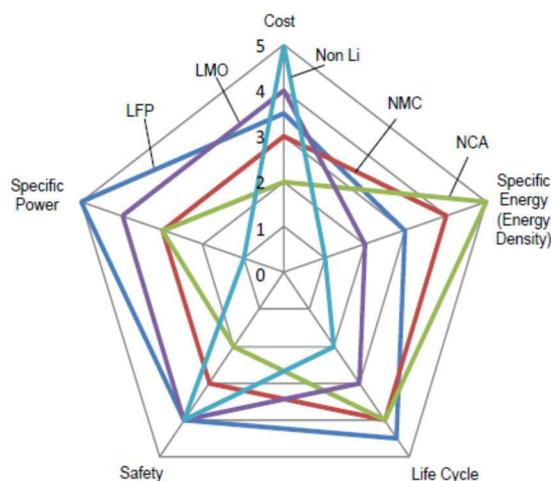


Figure A.1. Propriétés et avantages de chaque technologie. (Novinsky et al., 2014)

Chacune de ces quatre technologies exhibe des bonnes performances sur certains critères et de mauvaises selon d'autres. C'est ce qui explique la difficulté de l'émergence d'une technologie prépondérante. Cependant, nous pouvons distinguer deux catégories principales, du fait de leurs propriétés chimiques:

- Les batteries à base de nickel, manganèse et cobalt (LMO, LMO (avec LiNiO_2), NCA et NMC) : Les proportions de ces trois éléments définissent les propriétés exactes de ces batteries. Dans l'ensemble, elles sont plutôt chères, présentent une bonne durée de vie et d'autonomie avec des matériaux intéressants pour le recyclage.
- Les batteries LFP : Elles sont plutôt moins chères avec des matériaux moins intéressants pour le recyclage. Elles ont l'avantage d'être plus sûres et d'avoir une bonne durée de vie. Cependant, elles offrent moins d'autonomie.

Les batteries type : lithium-air, lithium sulfure sont différentes des batteries li-ion. Le Japon, un pays en pointe dans ce domaine, a établi la feuille de route suivante (Figure A.2). On y remarque que les batteries post-li-ion arriveront sur le marché à partir de 2030, sans toutefois remplacer complètement les batteries li-ion.

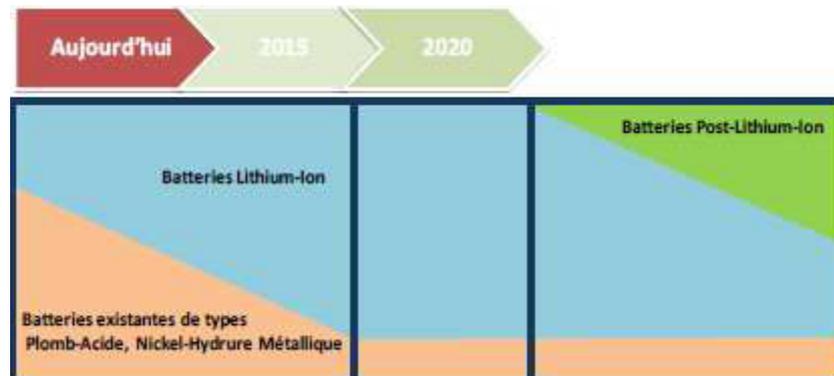


Figure A.2. Feuille de route des batteries automobiles au Japon. Adapté de (Pluchet and Destruel, 2010)

A.2 Fonctionnement d'une BLI

Lorsqu'une cellule se décharge, les ions Li^+ passent de l'anode à la cathode, ce qui libère des électrons dans le même sens. Ces derniers circulent à travers le collecteur de courant et servent à propulser le véhicule. Plusieurs formes sont possibles pour les cellules : cylindrique, pochette et prismatique (Lee et al., 2010). Les cellules en forme de pochette sont les plus utilisées pour les VEs (Ramoni and Zhang, 2013).

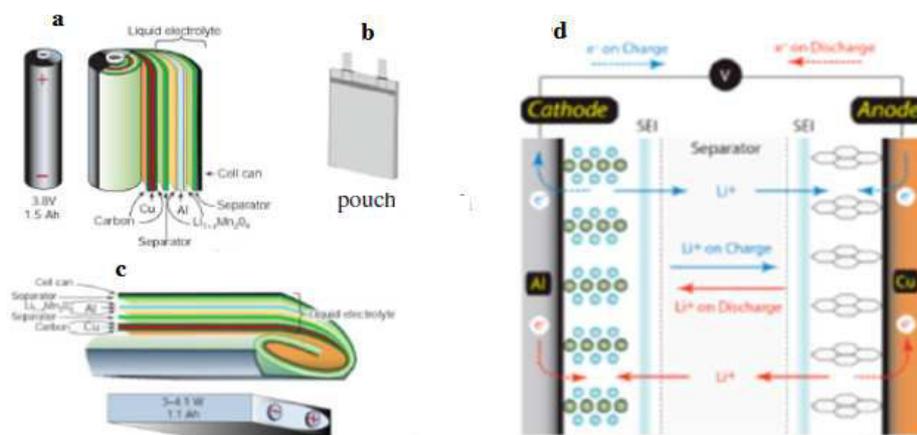


Figure A.3. (a, b, c) : Différentes formes géométriques des cellules. d : charge et décharge d'une cellule. Sources : (Ramoni and Zhang, 2013), (Zeng et al., 2013).

B. Annexes chapitre 3 (Modélisation)

B.1 Procédés et opérations élémentaires de recyclage

La figure suivante rappelle les procédés possibles.

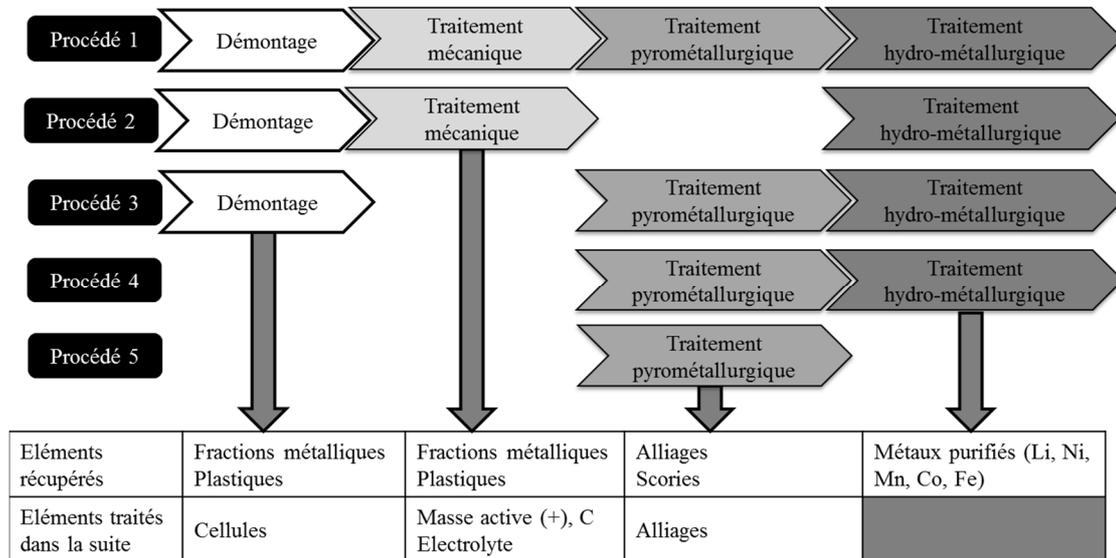


Figure B.1. Processus possibles de recyclage. Adapté de (Kwade, 2010; Sangwan and Jindal, 2013).

Au final, il existe cinq procédés possibles (en lignes sur la figure). A l'issue de chaque opération, certains éléments seront valorisés, d'autres seront traités dans les opérations ultérieures du procédé.

Démontage : lors du démontage, la partie électrochimique est séparée du reste de la batterie. Les modules sont séparés les uns des autres, voire démontés en cellules. Il s'agit d'une opération coûteuse en temps et en main d'œuvre. Néanmoins, une automatisation ou semi-automatisation est à l'étude (Herrmann et al., 2014; Weyrich and Natkunarajah, 2013). A la fin du démontage, on obtient :

- Des fractions métalliques et plastiques qui sont envoyées dans des filières de valorisation spécifiques ;
- Les modules (ou cellules) qui subiront des opérations de traitement supplémentaires.

Traitement mécanique : dans cette opération, les éléments de la cellule sont séparés par plusieurs procédés. Le plus souvent, il s'agit de broyage et de séparation mécanique. A l'issue de cette opération, on obtient :

- Des fractions métalliques et plastiques, qui sont envoyées dans des filières de valorisation spécifiques (acier, Al, Cu, séparateur plastique),
- Des solvants qui sont contenus dans l'électrolyte. Aujourd'hui, ils ne sont pas valorisés.
- La masse active des électrodes (black mass), qui contient éventuellement du cobalt, du nickel, du manganèse, du lithium, du fer, du carbone et du phosphate. Elle peut subir une opération d'hydrométallurgie pour la séparation sélective de ces métaux.

Traitement pyrométallurgique (opération réalisée dans des fours de pyrolyse) : les composés organiques sont brûlés et servent comme source d'énergie pour le four. Une installation de purification des gaz issus du four est nécessaire. On obtient :

- Un alliage de fer, de cuivre, de nickel et de cobalt qui peut éventuellement subir une opération d'hydrométallurgie pour la séparation de ces éléments. Sinon ces alliages sont revendus tels quels.
- Scories (aluminium, lithium, manganèse) qui peuvent être utilisées en cimenterie²⁴

Traitement hydro-métallurgique : c'est un traitement chimique utilisant des acides et des bases pour permettre la séparation sélective des métaux contenus dans la masse active ou dans l'alliage de la pyrolyse. C'est une opération chère et complexe (Sangwan and Jindal, 2013).

²⁴ C'est le cas dans le procédé d'Umicore

B.2 Flux potentiels entre les sous-systèmes de la filière

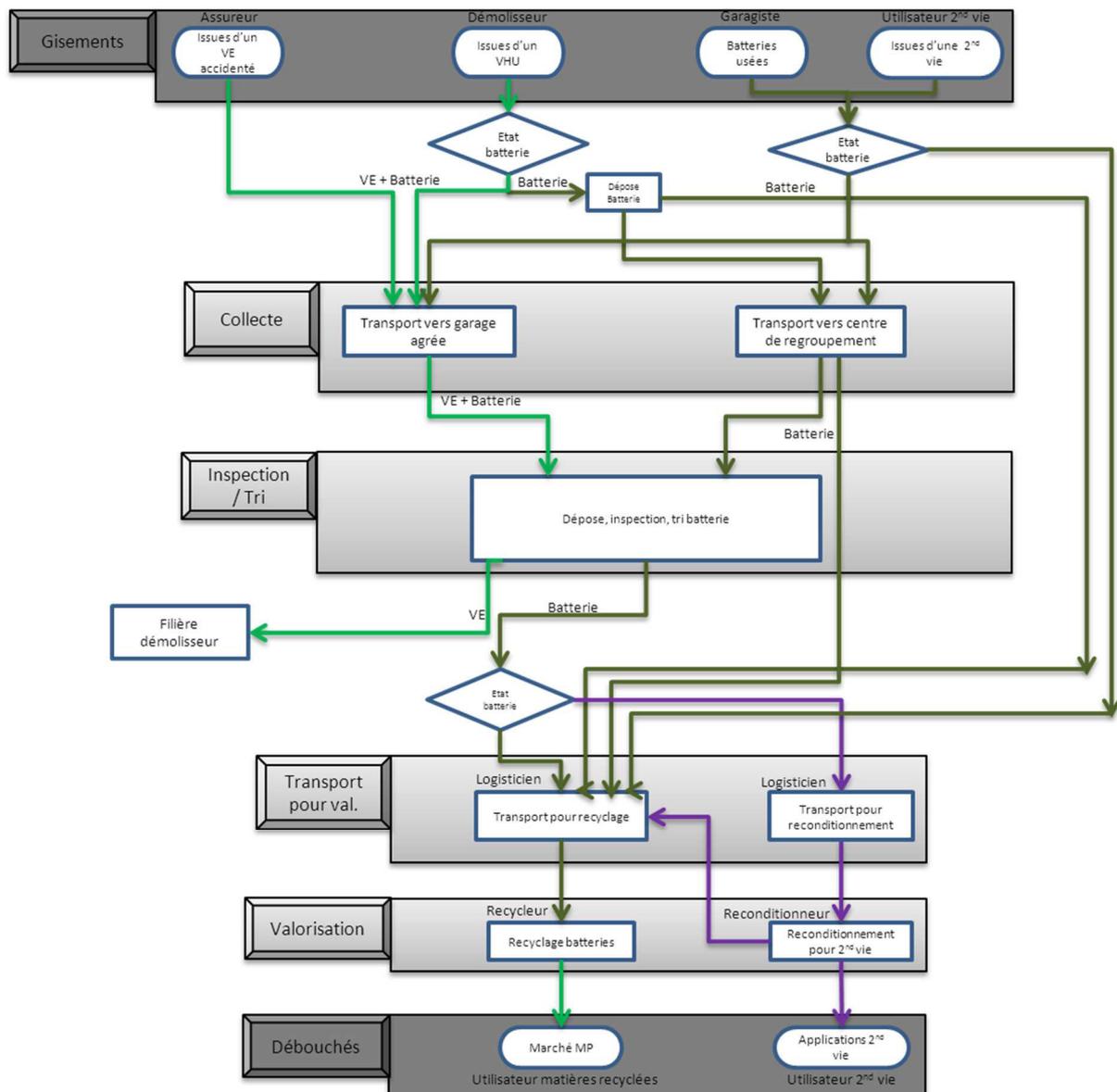


Figure B.2. Flux potentiels entre les sous-systèmes de la filière.

B.3 Concepts de la dynamique des systèmes (DS)

B.3.1 Les diagrammes causaux

Les diagrammes causaux sont utilisés pour capturer les influences (cause-effet) entre les variables. Les variables sont liées par des flèches (liens de causalités) qui peuvent avoir un signe positif ou négatif (Chaerul et al., 2008). Ces signes ont les significations suivantes :

- Un lien positif signifie que soit une variable augmente la valeur d'une autre ou bien qu'elles évoluent dans le même sens. Dans la figure suivante, une augmentation du capital induit une augmentation des intérêts supérieure à ce qu'il aurait été.
- Un lien négatif signifie que soit une variable diminue la valeur d'une autre ou bien qu'elles évoluent dans des sens opposés. Dans la figure suivante, une augmentation des taxes induit une diminution des intérêts inférieure à ce qu'il aurait été.

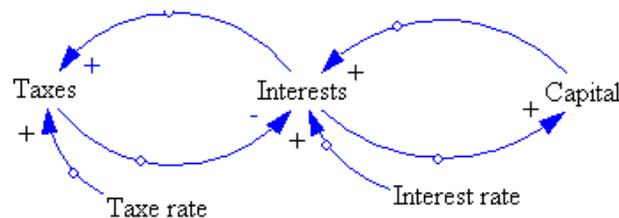


Figure B.3. Exemple d'un diagramme causal.

Dans les diagrammes causaux, les boucles de rétroaction sont définies comme des circuits fermés, constitués de liens de causalités successifs. Une boucle de rétroaction possède un signe et peut être soit positive ou négative.

- Positive (explosive) : nous reconnaissons une boucle de rétroaction positive si elle contient un nombre pair de liens de causalités négatifs. Dans la figure ci-dessus, la boucle (intérêts → capital → intérêts) ne contient pas de liens négatifs, c'est une boucle de rétroaction positive. Le plus de capital que vous avez, le plus d'intérêts que vous obtenez, ce qui augmente votre capital. C'est pourquoi elles sont aussi appelées «boucles explosives».
- Négative (stabilisatrice) : nous reconnaissons une boucle de rétroaction négative si elle contient un nombre impair de liens de causalités négatifs. Dans la figure ci-dessus, la boucle (intérêts → taxes → intérêts) contient un seul lien négatif, c'est une boucle de rétroaction négative. Une augmentation des intérêts augmente les impôts payés par l'épargnant, ce qui diminue les intérêts initiaux.

Il faut s'assurer de ne pas confondre «rétroaction positive» avec «vertu, bienfait», et «rétroaction négative» avec «critique, méfait» (Sterman, 2000).

B.3.2 Les diagrammes stock & flux

Un diagramme stock & flux est la traduction d'un diagramme causal dans le logiciel de simulation. Il contient des éléments tels que: les stocks, les flux (entrées et sorties), des convertisseurs et des connecteurs (Zhao et al., 2011). Les variables stocks (variables de niveau ou d'état) représentent l'accumulation des flux d'entrées et de sorties dans le système. Les variables de flux (variables de taux) représentent les activités qui remplissent (flux d'entrées) ou vident (flux de sorties) les stocks. Les convertisseurs (variables auxiliaires) sont utilisés pour les calculs intermédiaires des flux. Enfin, les connecteurs sont des liens d'information représentant les causes et effets à l'intérieur du modèle. Le diagramme stock & flux de la figure suivante est la translation du diagramme causal de la Figure B.3. Le capital est la variable de stock, il est rempli avec les intérêts (flux d'entrée) et drainé par les taxes sur les intérêts (flux de sortie), qui dépendent du taux d'intérêt et du taux d'imposition (convertisseurs), respectivement.

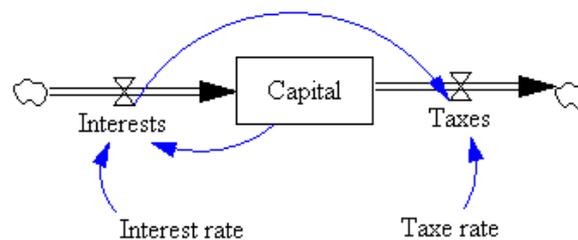


Figure B.4. Exemple d'un diagramme stock & flux.

Le diagramme stock & flux est traduit en un système d'équations différentielles, qui est résolu numériquement par la simulation (Georgiadis, 2013). Dans l'exemple décrit ci-dessus, on a les équations suivantes:

- $Capital(t) = Capital(t-dt) + Interest*dt - Taxes*dt$
- $Interest = Capital * Interest\ rate$
- $Taxes = Interests * Tax\ rate$

En plus des équations, les conditions initiales et les paramètres sont spécifiés. A titre d'exemple : Capital = 1000€, Interest rate = 3%, Tax rate = 15%

B.4 Formulation du modèle de simulation

Dans cette annexe, nous récapitulons les hypothèses qui ont servi à l'application de l'étape 3 de la méthode DS (3.2.2.3). La simulation de ce modèle est faite grâce aux diagrammes stock & flux, en spécifiant les conditions initiales, les paramètres et les équations entre les variables.

Les variables du modèle DS peuvent être distinguées en deux types :

- Les variables exogènes : spécifiées par l'utilisateur au début de la simulation
- Les variables endogènes calculées par le modèle en fonction des équations qui les définissent.

Nous nous intéressons dans un premier temps à la caractérisation des variables exogènes, Pour chaque bloc du modèle, nous allons :

- Introduire les variables exogènes en définissant leurs significations et les hypothèses dont nous disposons pour elles ;
- Conclure sur leurs incertitudes ; à l'aide de l'échelle expliquée ci-après,
- Indiquer pour l'analyse de sensibilité des variables incertaines, leurs valeurs de référence et intervalles de variation.

L'échelle pour l'appréciation de l'incertitude des variables est comme suit :

- Incertitude (-) : pour les variables peu incertaines
- Incertitude (+) : pour les variables pour lesquelles nous ne disposons pas d'hypothèses, ou qui présentent une grande variabilité dans ces dernières.

Une fois la caractérisation des variables exogènes faite, nous nous intéresserons aux variables endogènes, en illustrant les diagrammes stock & flux et les équations qui relient ces variables.

B.4.1 Caractérisation des variables exogènes

Nous rappelons la vue globale du modèle dans la figure suivante.

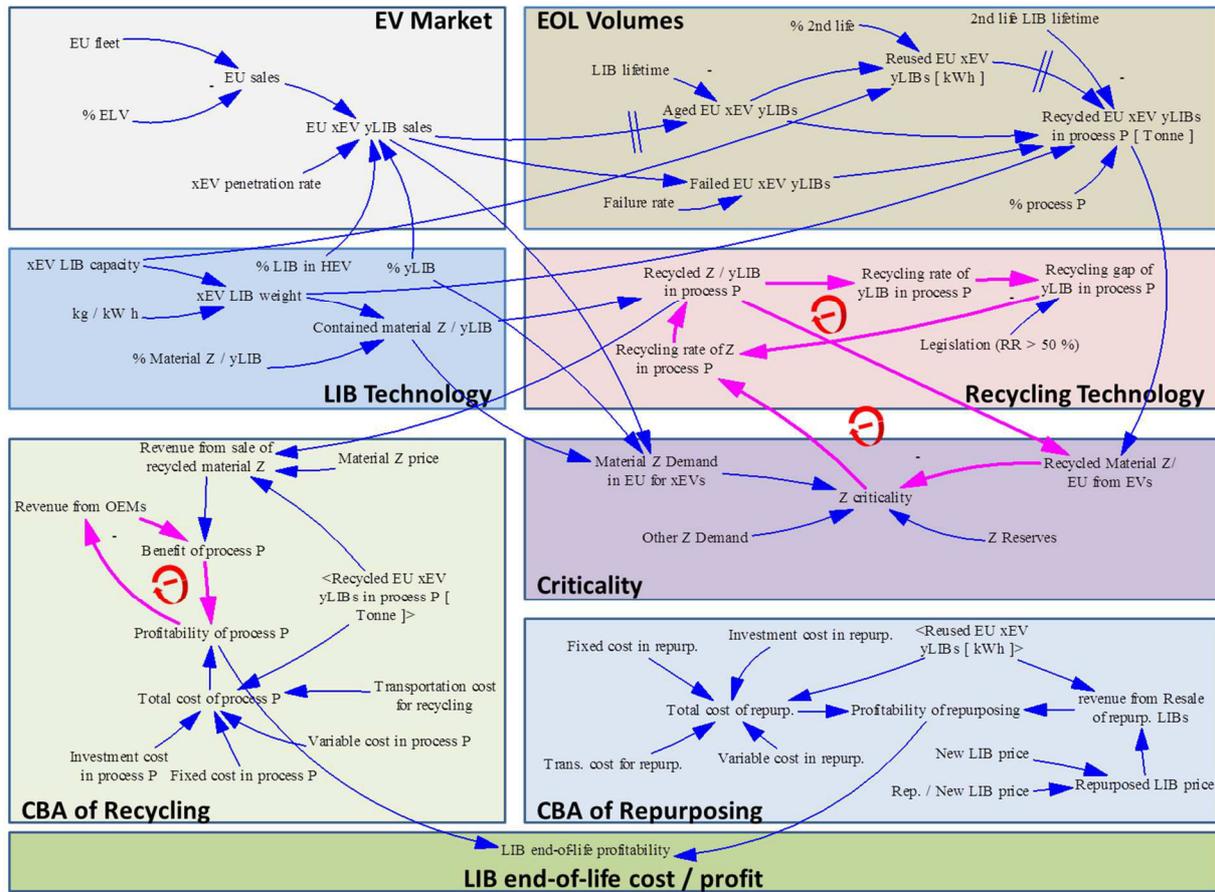


Figure B.5. Vue globale du modèle DS.

B.4.1.1 Variables du bloc « EV Market »

B.4.1.1.1 « EU fleet »

Cette variable traduit le nombre de véhicules particuliers en Europe par année. Cette variable ainsi que la variable suivante « %ELV » sont introduites pour le calcul des ventes annuelles en Europe, puisque nous ne disposons pas d'estimations directes de ces dernières.

A notre connaissance, les deux scénarios 4DS/6DS et 2DS²⁵ ; issus de (IEA, 2015), sont les seules hypothèses dont nous disposons pour cette variable jusqu'à l'horizon 2050.

²⁵ « Energy Technology Perspectives » (ETP) est un rapport publié par l'IEA s'intéressant à la transformation durable du système énergétique dans le futur. Dans les éditions de 2012, 2014 et 2015 (IEA, 2015, 2014, 2012a), trois scénarios énergétiques sont considérés :

* 6DS: c'est le scénario de référence, il correspond à une augmentation de la température à 6° en 2050 avec les politiques actuelles.

* 4DS : il prend en compte les politiques actuelles et futures, il correspond à une augmentation de la température à 4° en 2050.

* 2DS : c'est un scénario challengeant, qui a pour but de contenir l'augmentation de température à 2° en 2050.

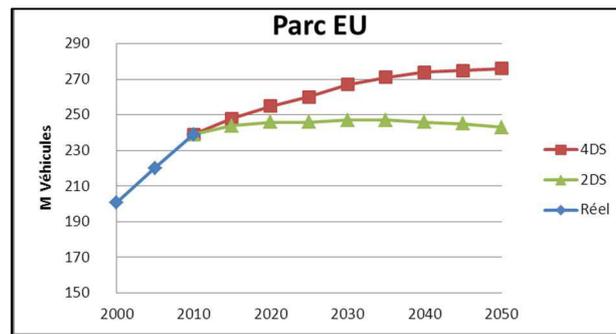


Figure B.6. Estimation du parc automobile européen dans les scénarios ETP.

Les deux courbes délimitent le spectre des possibilités d'évolution du parc depuis 2010, avec une stagnation à partir de 2020 pour la courbe 2DS et 2040 pour la courbe 4DS. La variabilité maximale est atteinte en 2050 (276 M pour 4DS et 243 M pour 2DS), ce qui représente un écart maximal de 12 %. **Ainsi, nous considérons que c'est une variable incertaine (+), pour laquelle nous allons effectuer une analyse de sensibilité.** Nous allons prendre la courbe 4DS comme valeur référence et un intervalle de variation [-12% ; 0%].

B.4.1.1.2 « % ELV »

Cette variable traduit la proportion des véhicules dans le parc qui arrivent en fin de vie par année. Comme nous ne disposons pas de données bibliographiques directes pour cette variable, nous l'avons estimée de la manière suivante.

Nous avons introduit l'équation (1), pour mettre en relation les ventes annuelles estimées (V_{est}), le parc (P) et la mortalité (%ELV)

Équation 1

Nous avons calibré cette équation, à l'aide d'un programme d'optimisation pour obtenir le « %ELV » qui minimise la différence maximale entre les ventes estimées (V_{est}) et les ventes réelles ($V_{rée}$), comme le montre le tableau suivant. L'historique du parc et des ventes entre 1995 et 2007 a été utilisé dans cette phase. Nous n'avons pas inclus les données à partir de 2008, à cause de la crise financière et de politiques comme celle de la prime à la casse en France, qui avait changé le marché et la mortalité *naturelle* des véhicules.

Année	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
P(n)	181,75	185,63	189,51	193,39	197,27	201,15	204,78
V rée (n)	11,67	12,40	13,01	13,94	14,63	14,32	14,40
V est (n)	-	13,16	13,35	13,54	13,74	13,93	13,86
Erreur		6,1%	2,7%	2,8%	6,1%	2,7%	3,7%
Année	2002	2003	2004	2005	2006	2007	

P(n)	208,18	212,10	216,11	220,22	224,41	229,32
V rée (n)	14,01	14,71	14,95	14,86	15,42	15,57
V est (n)	13,80	14,52	14,81	15,12	15,40	16,37
Erreur	1,5%	1,3%	1,0%	1,8%	0,1%	5,1%

Tableau B.1. Calcul des écarts entre les ventes estimées et réelles.

Ainsi, l'erreur maximale est de 6,1 % et l'erreur moyenne est de 2,9%, obtenues grâce à une valeur optimale: $\%ELV = 5\%$. Nous estimons que c'est une marge d'erreur acceptable et considérons que c'est une variable peu incertaine (-), dont nous fixons la valeur à 5%.

B.4.1.1.3 « xEV penetration rate »

Cette variable traduit le pourcentage des ventes VE, VHR et VHY dans les ventes globales par année en Europe. L'étude du marché des VEs est une tâche difficile. Contrairement à d'autres produits, les VEs présentent certaines caractéristiques qui rendent difficile leurs modélisations avec les outils classiques, tel que l'inexistence des données historiques ou le changement du comportement des consommateurs (Al-Alawi and Bradley, 2013).

Les scénarios de pénétration des VEs doivent être multicritères, incluant les aspects économiques, sociaux et environnementaux (Torchio and Santarelli, 2010; Zubaryeva et al., 2012). Même si les chercheurs sont conscients de la nécessité et des défis de l'inclusion de ces critères, les résultats diffèrent considérablement (Pasaoglu et al., 2012).

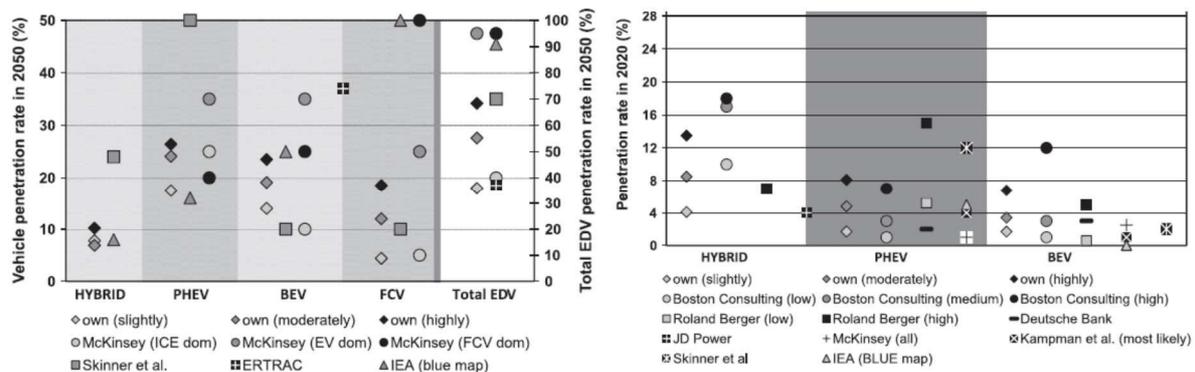


Figure B.7. Taux de pénétrations des VEs en Europe, en 2020 et 2050. (Pasaoglu et al., 2012)

Pasaoglu et al. (2012) affirment que certaines de ces études ; (Boston Consulting Group, 2009; J.D. Power and Associates, 2010; Kampman et al., 2011; Roland Berger Strategy Consultants, 2010), sont des études à court terme et ne fournissent pas suffisamment de détails quantitatifs concernant leurs hypothèses. Elles reflètent une vision dépassée.

En ce qui concerne notre travail, **nous allons nous concentrer sur des études récentes (à partir de 2012), long terme et multicritères**, c'est notamment le cas des scénarios énergétiques. Ainsi, nous retenons les scénarios de ventes de VEs suivants:

- Deux scénarios (2DS et 4DS) issus de (IEA, 2015, 2012a), que nous appelons : *ETP_2DS* et *ETP_4DS* respectivement.
- Trois scénarios (Moderately decarbonised, Slightly decarbonised, Highly decarbonised) issus de (Pasaoglu et al., 2012), que nous appelons : *EU²⁶_Sligh*, *EU_Mod.* et *EU_High.* respectivement
- Un scénario français issu de (ADEME, 2012) que nous incluons puisque c'est un marché important et représentatif de l'Europe. Nous l'appelons : *Ademe FR*.

Au final, nous considérons 6 scénarios possibles pour la pénétration des VEs en Europe jusqu'à l'horizon 2050. Le tableau suivant récapitule les estimations de ces derniers.

Scenario	xEV	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
ETP_2DS	EV	0,0%	0,2%	1,6%	3,3%	7,1%	11,3%	19,3%	28,3%	37,6%
ETP_2DS	PHEV	0,0%	0,8%	5,3%	12,3%	18,4%	24,1%	27,3%	32,3%	40,1%
ETP_2DS	HEV	0,0%	9,5%	11,9%	14,7%	17,0%	16,3%	16,7%	12,8%	7,3%
ETP_4DS	EV	0,0%	0,1%	1,1%	1,3%	1,6%	1,9%	2,2%	5,4%	9,7%
ETP_4DS	PHEV	0,0%	0,5%	2,9%	4,3%	6,6%	8,8%	10,3%	13,0%	17,3%
ETP_4DS	HEV	0,0%	2,4%	7,5%	17,7%	19,9%	25,4%	28,8%	31,5%	32,4%
Ademe FR	EV	0,0%				10,0%				28,0%
Ademe FR	PHEV	0,0%				22,0%				38,0%
Ademe FR	HEV	0,5%				37,0%				
EU_Sligh.	EV			0%		4%				17%
EU_Sligh.	PHEV			0%		4%				22%
EU_Sligh.	HEV			4%		12%				9%
EU_Mod.	EV			4%		8%				20%
EU_Mod.	PHEV			6%		12%				25%
EU_Mod.	HEV			10%		17%				6%
EU_High.	EV			8%		14%				25%
EU_High.	PHEV			9%		16%				27%
EU_High.	HEV			15%		20%				12%

Tableau B.2. Taux de pénétrations selon les scénarios.

²⁶ Scénarios élaborés par le Joint Research Centre (JRC), qui est sous tutelle de l'UE.

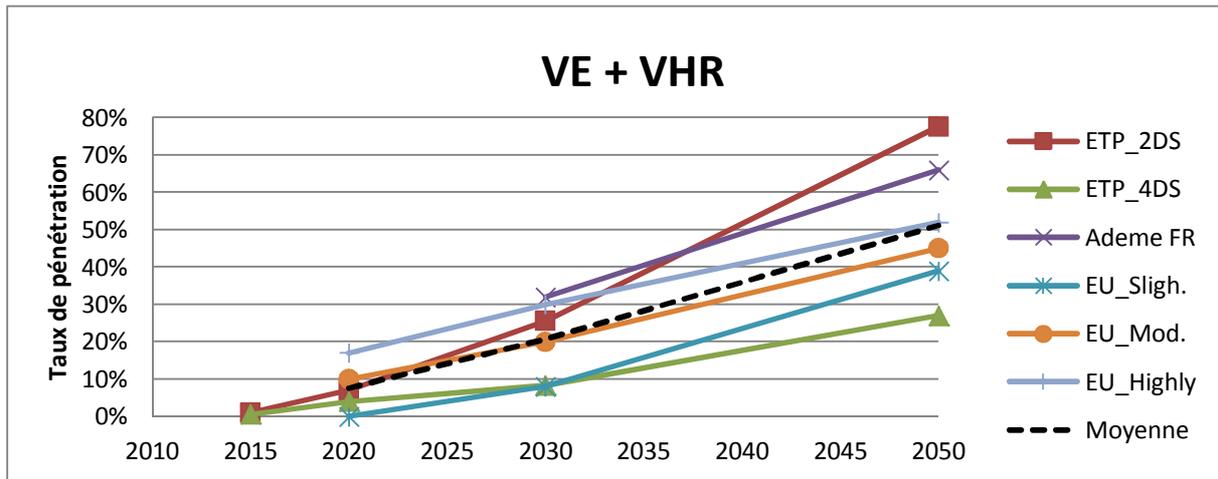


Figure B.8. Taux de pénétrations des VE et VHRs en Europe

Nous constatons que les scénarios EU délimitent le spectre des possibilités entre 2020 et 2030. Puis, c'est les scénarios ETP. Les écarts moyens à l'horizon 2030 pour les VEs, VHRs et VHYs sont : 88%, 67% et 80%, respectivement. **Nous concluons que c'est une variable très incertaines (+), pour laquelle nous allons procéder à une analyse de sensibilité.** Nous allons prendre la moyenne entre les taux 2DS et 4DS comme valeurs de références et un intervalle de variation [-50% ; +50%].

B.4.1.2 Variables du bloc « EOL Volumes »

B.4.1.2.1 « LIB lifetime »

Cette variable traduit la durée de vie calendaire automobile d'une BLI. Le tableau suivant récapitule l'ensemble des hypothèses bibliographiques dont nous disposons.

Source	Durée de vie BLI
(ADEME, 2013c)	10 ans
(Wang et al., 2014b)	10 ans
(Amarakoon et al., 2013)	10 ans
(Harper et al., 2012)	10 ans
(Gruber et al., 2011)	10 ans
(Yaksic and Tilton, 2009)	10 ans

Tableau B.3. Hypothèses concernant la durée de vie auto d'une BLI.

Ainsi, il y a consensus sur cette durée de vie, mais ces études ne considèrent pas une amélioration de cette dernière dans le futur. Des efforts de recherche et développement ont pour but de l'augmenter jusqu'à 15 ans (Chalk and Miller, 2006; Kalhammer et al., 2009). C'est notamment l'objectif du consortium américain des batteries avancées (USABC) (Neubauer et al., 2014; USABC, 2015). L'hypothèse d'une durée de vie cible à 15 ans, a également été énoncée lors de nos workshops de construction du modèle DS.

La durée de vie d'un VE serait plus difficile à prévoir car dépendante de plusieurs paramètres. Par exemple, l'utilisation intensive (auto-partage) induira une durée de vie plus courte. Néanmoins, les études précitées considèrent la même durée de vie BLI, comme le montre le tableau suivant.

Source	Durée de vie VE
(ADEME, 2013c)	10 ans
(Amarakoon et al., 2013)	10 ans
(Gruber et al., 2011)	10 ans
(Richa et al., 2014)	10 ans

Tableau B.4. Hypothèses concernant la durée de vie du VE.

Dans ce travail, nous considérons que la BLI et le VE auront la même durée de vie. Par conséquent, notre modèle ne prévoit pas de remplacements de BLIs dus à une mortalité naturelle. Les seuls remplacements considérés résultent de la défaillance prématurée des BLIs, comme nous allons le voir à la section suivante.

Nous considérons que la variable « LIB lifetime » est une variable incertaine (+), pour laquelle nous allons procéder à une analyse de sensibilité. Nous allons prendre 10 ans comme valeur de référence et un intervalle de variation [0% ; +50%].

B.4.1.2.2 « Failure rate »

Cette variable traduit la proportion des véhicules défectueux dans le parc par an. A notre connaissance, il n'y a pas d'estimations bibliographiques pour cette dernière. Aujourd'hui, le retour d'expérience indique un taux de défaillance plutôt faible. Nous avons pris ; en accord avec les experts que nous avons rencontrés et les chiffres communiqués par les constructeurs (Fabry, 2015), l'hypothèse d'un taux de défaillance à **0,25%**. **Nous considérons que c'est une variable incertaine (+), pour laquelle nous allons procéder à une analyse de sensibilité.** Nous allons prendre 0,25% comme valeur de référence et un intervalle de variation [-50% ; +50%].

B.4.1.2.3 « 2nd life LIB lifetime »

Cette variable traduit la durée de vie calendaire d'une BLI en usage 2nde vie. Le tableau suivant récapitule l'ensemble des hypothèses bibliographiques dont nous disposons.

Source	Durée 2 nd e vie	Durée auto
(Caumon, 2011)	5 ans	
(Heymans et al., 2014)	10 ans	8 ans
(Ahmadi et al., 2014a)	10 ans	8 ans

(Ahmadi et al., 2014b)	10 ans	8 ans
(Hein et al., 2012)	7 ans	
(Neubauer et al., 2012)	5 ans	10 ans

Tableau B.5. Hypothèses concernant la durée de vie 2^{nde} vie d'une BLI.

En considérant que la durée de vie automobile sera au minimum 10 ans, nous déduisons que la durée de vie en usage 2^{nde} vie sera entre 5 et 8 ans.

Nous considérons que la variable « 2nd life LIB lifetime » est une variable incertaine (+), pour laquelle nous allons procéder à une analyse de sensibilité. Nous allons prendre 5 ans comme valeur de référence et un intervalle de variation [0% ; +50%].

B.4.1.2.4 « % 2nd life »

Cette variable traduit le pourcentage des BLIs en fin de vie automobile reconditionnées pour un usage en 2^{nde} vie. En termes de véhicules concernés, les BLIs VE et VHR sont considérées dans (Ahmadi et al., 2014b; Chen et al., 2013; Heymans et al., 2014; Neubauer and Pesaran, 2011; Neubauer et al., 2012; Sathre et al., 2015; Tong et al., 2013). Hein et al. (2012) sont les seuls à considérer uniquement les VEs. Les VHYS n'ont pas été considérés dans aucune étude. **Ainsi, nous considérons que les BLIs VE et VHR sont susceptibles d'être réutilisées en 2^{nde} vie, dans les mêmes proportions.**

Aujourd'hui, nous ne disposons pas d'éléments pour cette variable. **Nous considérons que c'est une variable très incertaine (+), pour laquelle nous allons procéder à une analyse de sensibilité.** Nous allons prendre 50% comme valeur de référence et un intervalle de variation [-50% ; +50%].

B.4.1.2.5 « % Process 1 & 2 »

Cette variable traduit la proportion du volume recyclé dans le procédé P1, Par conséquent celui dans le procédé P2 (1 - %P1). Aujourd'hui, nous ne disposons pas d'éléments pour cette variable. **Nous considérons que c'est une variable très incertaine (+), pour laquelle nous allons procéder à une analyse de sensibilité.** Nous allons prendre 50% comme valeur de référence et un intervalle de variation [-50% ; +50%].

B.4.1.3 Variables du bloc « LIB Technology »

B.4.1.3.1 « % LIB in HEV »

Cette variable traduit la proportion des véhicules VHY (HEV) qui utilisent la technologie BLI. Aujourd'hui, la plupart des VHYS sont propulsés par des batteries Ni-MH, avec un

remplacement progressif par les BLIs. Cela s'explique par la diminution du prix des BLIs, la différence de leurs performances par rapport au Ni-MH et la présence de terres rares dans les Ni-MH. Ce changement vers les BLIs étant acquis, l'incertitude demeure dans le rythme et l'horizon de cette évolution. Le tableau suivant récapitule les hypothèses dont nous disposons.

Année	(Jobin et al., 2009) : Top-down	(Jobin et al., 2009) : Bottom-up	(Avicenne Energy, 2014, 2013)	Notre estimation ²⁷
2015	27%	52%	15%	
2020	62%	75%	35%	100%
2025	72%	100%	90%	
2030	82%			
2032	100%			

Tableau B.6. % BLI dans les VHYs selon les différentes références.

Nous constatons une grande variabilité entre ces estimations. **Nous concluons que c'est une variable très incertaine (+), pour laquelle nous allons procéder à une analyse de sensibilité.** Nous allons prendre 50% (en 2020) et 100% (en 2025) comme valeurs de références et un intervalle de variation [-30% ; 0%].

B.4.1.3.2 « % NMC & LFP LIB »

Cette variable traduit la proportion des BLIs NMC, par conséquent LFP (1 - %NMC). Dans la littérature, les batteries LFP sont considérées dans des scénarios alternatifs, où elles perceront en 2020 (ADEME, 2013c). Dans (Hoyer et al., 2014), deux hypothèses sont considérées :

- 80%NMC et 20% LFP sur toute la période considérée (2015 – 2030)
- Percée des LFP toujours à partir de 20% en 2015, pour atteindre 80 % en 2030

En ce qui concerne la technologie NMC et selon les experts que nous avons rencontrés, Il est probable que le type (LiMnNiCo_(0,33)O₂) reste la technologie de référence jusqu'à l'horizon 2020, puis on peut imaginer :

- Un enrichissement en Nickel : LiNi_{0,8}Co_{0,1}Mn_{0,1}O₂
- Un enrichissement en Manganèse : LiNi_{0,1}Co_{0,1}Mn_{0,8}O₂

Ainsi, Nous considérons que c'est une variable très incertaine (+), pour laquelle nous allons procéder à une analyse de sensibilité. Nous allons prendre 50% comme valeur de référence et un intervalle de variation [-50% ; +50%].

²⁷ Hypothèse formulée par les experts que nous avons rencontrés.

B.4.1.3.3 « xEV LIB capacity »

Cette variable traduit la quantité d'énergie embarquée dans un VE, VHR et VHY, elle est responsable de l'autonomie de ces derniers. Nous faisons appel à cette variable pour le calcul du poids des BLIs, car aujourd'hui nous disposons de plus d'éléments sur la capacité d'une BLI que sur son poids. Le poids d'une BLI est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$xEV\ LIB\ weight = xEV\ LIB\ capacity * kg/kWh \quad \text{Équation 2}$$

Le tableau suivant récapitule l'ensemble des hypothèses dont nous disposons.

Source	VE	VHR	VHY
(Avicenne Energy, 2014, 2013)	25 kWh	10 kWh	1 kWh
(Amarakoon et al., 2013)	> 40 kWh	5 - 10 kWh	1 - 2 kWh
(Gruber et al., 2011)	42 - 60 kWh	13 - 20 kWh	0,6 - 0,8 kWh
(Novinsky et al., 2014)	20 - 30 kWh	13 kWh	0,8 - 2 kWh
(Kushnir and Sandén, 2012)	36 kWh	9 kWh	
(Vikström et al., 2013)	EV = 25 kWh	9 kWh	
(ADEME, 2013c)	24 kWh		
(Hein et al., 2012)	25 kWh		
(Miedema and Moll, 2013)		10 kWh	

Tableau B.7. Récapitulatif des hypothèses concernant la capacité des BLIs

Nous constatons l'existence d'une variabilité entre les différentes estimations, surtout pour les VE. Ainsi, **nous considérons que c'est une variable très incertaine (+), pour laquelle nous allons procéder à des analyses de sensibilités.** Nous allons prendre 24 kWh, 10 kWh et 1,5 kWh comme valeurs de références pour le VE, VHR et VHY respectivement, et un intervalle de variation [0% ; +25%].

B.4.1.3.4 « kg / kWh »

Nous rappelons que nous faisons appel à cette variable pour le calcul du poids des BLIs. Ce rapport (kg / kWh) traduit le nombre de kilogrammes dans un pack (partie chimique et électrochimique) pour embarquer 1 kWh. Nous avons estimé cette variable en analysant les BLIs déjà commercialisées, à défaut d'avoir des hypothèses bibliographiques.

Modèle	Capacité (kWh)	Poids (kg)	kg/kWh	Moyenne (kg/kWh)	Ecart
Golf GTE	8,7	120	13,8	13,8	
Ampera	16	198	12,4	12,5	1,2%
i-MiEV	16,5	220	13,3		6,9%
C-Zero	16,5	220	13,3		6,9%
ZOE	22	290	13,2		5,7%
Think City	22	260	11,8		5,2%

Kangoo Van Z.E.	22	260	11,8		5,2%
Focus Electric	23	272	11,8		5,1%
C30 Electric	24	280	11,7		6,4%
LEAF	24	294	12,3		1,7%
e-Golf	24,2	318	13,1		5,4%
Kia Soul EV	27	282	10,4	10,4	0,9%
Sedan	31	318	10,3		0,9%

Tableau B.8. Estimation empirique de la variable kg/kWh.

Nous distinguons trois intervalles de capacités.

- <15 kWh : Concerne les VHRs, avec un rapport = 13,8 kg/kWh.
- 15 kWh < capacité < 25 kWh : Concerne les VEs ayant une autonomie moyenne, avec un rapport moyen = 12,5 kg/kWh. L'écart maximal autour de cette moyenne est inférieur à 7%.
- > 25 kWh : Concerne les VEs ayant une plus grande autonomie, avec un rapport moyen = 10,4 kg/kWh.

La diminution de ce rapport avec l'augmentation de la capacité s'explique par la décomposition de la BLI en partie électrochimique et support. En augmentant la partie électrochimique de 'x', on aurait besoin d'une augmentation '< x' de la partie support.

Quant à l'éventuelle amélioration de ce rapport dans l'avenir, nous prenons l'hypothèse que cela n'aura pas d'impact sur les futurs poids des BLIs. En effet, la diminution du rapport « kg / kWh » donne l'opportunité d'augmenter la capacité des BLIs afin de renforcer l'attractivité des VEs. Au final, nous aurons un poids équivalent et une capacité plus grande que ce que nous supposions ici.

Ainsi, nous considérons que la variable « kg / kWh » est peu incertaine (-), nous fixons sa valeur en fonction de la capacité, comme le montre le graphique suivant.

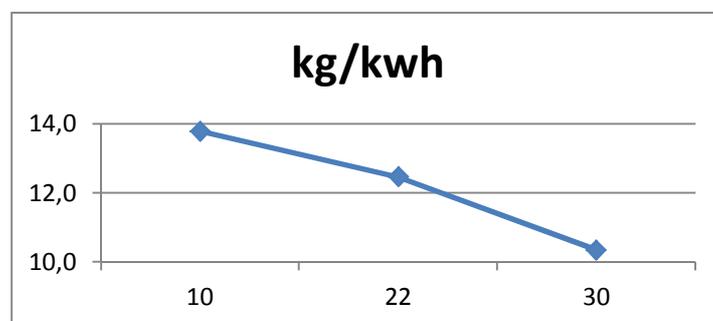


Figure B.9. Notre estimation de la variable « kg / kWh ».

B.4.1.3.5 « % Material Z / yLIB »

Cette variable concerne la décomposition analytique d'une batterie, à savoir la proportion d'une matière Z dans une batterie NMC ou LFP. Nous invitons le lecteur à revoir la section (1.4.2) pour se rappeler des éléments composant une BLI. Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés à la décomposition par parties d'éléments.

Source	% Cellules	% Masse active (+)
(ADEME, 2013c)	65%	30% des cellules, 20% du pack
(Amarakoon et al., 2013)	55 - 65%	22 - 31% du pack
(Kieckhäfer et al., 2013)	63%	20% du pack
(Buchert et al., 2011)	53 - 63%	18% du pack
(Richa et al., 2014)		30% des cellules
(Gaines et al., 2011)		30% des cellules

Tableau B.9. Proportions des cellules et de la masse active positive dans le pack.

Même s'il existe une légère variabilité dans la proportion des cellules, nous remarquons un consensus quant à la proportion de la masse active positive (18 – 20% du pack). Nous rappelons que c'est cette dernière qui donne le nom de la batterie (NMC, LFP). Nous allons maintenant nous intéresser à la décomposition par matière, à commencer par les batteries NMC. Pour ce faire, nous avons repris les hypothèses des deux projets Lithorec et LiBRi²⁸.

Matière	LiBRi - (Buchert et al., 2011)	Lithorec - (Kieckhäfer et al., 2013)	Ecart
Acier	21,3%	21%	0,3%
Plastiques	16,1%	11%	5,1%
Cu	7,9%	8%	-0,1%
Al	6,1%	6%	0,1%
C	14,0%	15%	-1,0%
Electrolyte	11,4%		
Masse active (+)	19,1%	20%	-0,9%
Autres	4,2%	19%	

Tableau B.10. Proportions des matières dans un pack selon les deux projets.

Ainsi, il apparait un consensus dans la composition des BLIs NMC, à l'exception des matières plastiques. Cependant, les résidus constituent 19% dans (Kieckhäfer et al., 2013). Il est probable que la différence soit contenue dans ces derniers.

Passons à présent à la différence entre les BLIs NMC et LFP. Dans le projet Lithorec, les deux technologies ont été considérées d'une manière similaire. Dans le projet LiBRi, nous reportons les proportions suivantes (Buchert et al., 2011):

²⁸ Voir la section (2.2.2) pour le descriptif de ces deux projets.

Matière	% dans NMC	% dans LFP	Moyenne	Ecart
Acier	21,3%	30,6%	26,0%	4,6%
Plastique	16,1%	14,5%	15,3%	-0,8%
Cu	7,9%	9,8%	8,9%	0,9%
Al	6,1%	6,4%	6,3%	0,1%
C	14,0%	11,1%	12,6%	-1,5%
Electrolyte	11,4%	8,5%	10,0%	-1,5%
Masse active (+)	19,1%	17,4%	18,3%	-0,9%
Autres	4,2%	2,0%	3,1%	-1,1%

Tableau B.11. Hypothèses du projet LiBri pour la décomposition des batteries NMC et LFP.

Nous constatons également une similitude dans la décomposition des deux BLIs, à l'exception de l'acier. Là également, les résidus NMC peuvent atténuer cette différence.

En ce qui concerne notre travail, à l'instar du projet Lithorec, nous allons considérer une décomposition moyenne unique, que nous illustrons dans le tableau suivant. Il s'agit de la troisième colonne du tableau précédent (Tableau B.11) dans laquelle, nous avons réparti la catégorie « autres » entre les matières : Acier et plastique.

Matière	% dans pack	% Contenu dans support	% Contenu dans Cellules	% dans cellule
Acier	28,8%	24,4%	4,4%	7,3%
Plastique	15,0%	10,5%	4,5%	7,5%
Cu	9,0%	3,0%	6,0%	10,0%
Al	6,3%	2,1%	4,2%	7,0%
C	12,6%		12,6%	21,0%
Electrolyte	10,0%		10,0%	16,7%
Masse active (+)	18,3%		18,3%	30,5%
Total	100%	40%	60%	100%

Tableau B.12. Notre hypothèse pour la décomposition d'une BLI.

Ainsi, la seule différence entre les deux technologies NMC et LFP se situe dans ce qui constitue la masse active positive. A présent, nous allons développer le contenu de cette dernière. Pour ce faire, nous utilisons les formules chimiques de chacune (NMC = $\text{Li}_1\text{Mn}_{0,33}\text{Ni}_{0,33}\text{Co}_{0,33}\text{O}_2$, LFP = $\text{Li}_1\text{Fe}_1\text{P}_1\text{O}_4$)

Matière	Masse molaire	Nb molécules dans NMC	% dans masse molaire NMC	Nb molécules dans LFP	% dans masse molaire LFP
Li	6,94	1	7,2%	1	4,4%
Ni	58,69	0,33	20,3%		
Mn	54,94	0,33	19,0%		
Co	58,93	0,33	20,4%		
O	16	2	33,2%	4	40,6%
Fe	55,85			1	35,4%
P	30,97			1	19,6%

Masse molaire totale	96,46	100%	157,76	100%
----------------------	-------	------	--------	------

Tableau B.13. Proportions des matières composant les masses actives (+) NMC et LFP.

Au final, en incluant les éléments qui composent les masses actives positives, nous obtenons les tableaux de compositions suivants.

Matière	% dans le pack	% Contenu dans support	% Contenu dans Cellules	% dans cellule
Acier	28,8%	24,4%	4,4%	7,3%
Plastique	15,0%	10,5%	4,5%	7,5%
Cu	9,0%	3,0%	6,0%	10,0%
Al	6,3%	2,1%	4,2%	7,0%
C	12,6%		12,6%	21,0%
Electrolyte	10,0%		10,0%	16,7%
Li	1,3%		1,3%	2,2%
Ni	3,7%		3,7%	6,2%
Mn	3,5%		3,5%	5,8%
Co	3,7%		3,7%	6,2%
O	6,1%		6,1%	10,1%
Total	100%	40%	60%	100%

Tableau B.14. Décomposition analytique d'une batterie NMC ($\text{LiMnNiCo}_{(0,33)}\text{O}_2$).

Matière	% dans le pack	% Contenu dans support	% Contenu dans Cellules	% dans cellule
Acier	28,8%	24,4%	4,4%	7,3%
Plastique	15,0%	10,5%	4,5%	7,5%
Cu	9,0%	3,0%	6,0%	10,0%
Al	6,3%	2,1%	4,2%	7,0%
C	12,6%		12,6%	21,0%
Electrolyte	10,0%		10,0%	16,7%
Li	0,8%		0,8%	1,3%
O	7,4%		7,4%	12,4%
Fe	6,5%		6,5%	10,8%
P	3,6%		3,6%	6,0%
Total	100%	40%	60%	100%

Tableau B.15. Décomposition analytique d'une batterie LFP ($\text{Li}_1\text{Fe}_1\text{P}_1\text{O}_4$).

Pour récapituler, nous constatons que la source de variabilité principale ; dans la composition des BLIs, est ce qui constitue la masse active positive. Nous allons également voir que c'est la variabilité la plus pertinente à considérer, vu la contribution de ses matières au revenu du recyclage et à la consommation des matières (chapitre 4).

En considérant deux technologies BLIs (NMC et LFP) puis une sensibilité autour de la technologie NMC (enrichissement en nickel ou en manganèse), **nous concluons que la variable « % Material Z / yLIB » est peu incertaine (-).**

Pour mettre en pratique toutes les variables introduites dans cette section concernant le bloc « LIB Technology », nous allons dérouler un exemple.

Supposons une batterie NMC d'une capacité de **30 kWh**. En considérant le rapport « kg/kWh » de la Figure B.9, cette batterie pèse : **312 kg** ($30 * 10,4$). Ainsi, cette batterie contient : **4,1 kg** de lithium ($312 * 0,013$).

B.4.1.4 Variables du bloc « Recycling Technology »

B.4.1.4.1 « Recycling rate of Z in process P »

Ces variables traduisent le taux de recyclage '**théorique**' d'une matière Z contenue dans une BLI (Fe, Plastique, Al, Cu, Li, Ni, Co, Mn, C, P) dans un procédé de recyclage P (P1 & P2). Nous les avons qualifiés de théoriques puisque certaines matières (Li, Mn, C par exemple) ne sont pas effectivement recyclées en industrie aujourd'hui, pour des motifs économiques. Si elles venaient à le devenir, elles le seront aux taux que nous indiquons ci-dessus. C'est le modèle DS qui déterminera si elles le seront dans l'avenir, en fonction de leur criticité et du taux de recyclage réglementaire (50% du poids de la BLI). Le seuil de criticité que nous avons défini pour le recyclage d'une matière non recyclée auparavant est la consommation de 50% des réserves, à défaut d'avoir une estimation bibliographique (Achzet and Helbig, 2013). Concernant la satisfaction du taux de recyclage réglementaire, la matière qui y contribue le plus sera recyclée en priorité, lorsque le taux de recyclage de la BLI est inférieur à 50%.

Nous rappelons les trois opérations élémentaires de chacun des deux procédés dans la figure suivante, plus de détails sont fournis dans l'annexe (B.1).

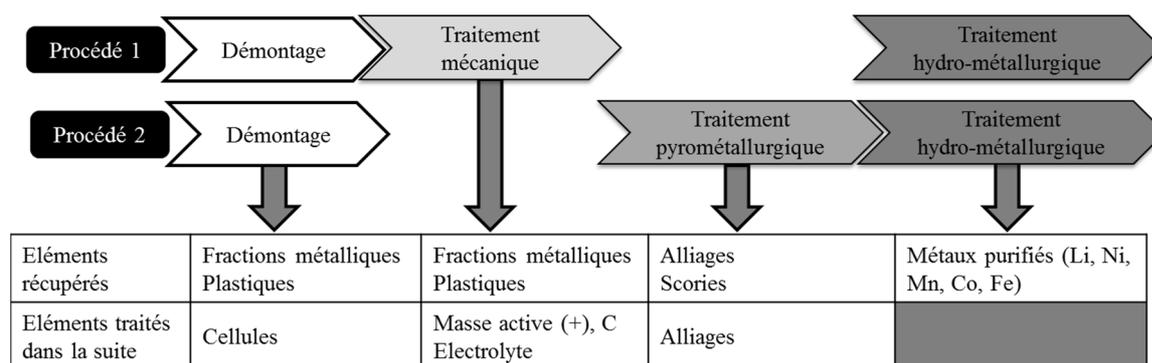


Figure B.10. Rappel des deux procédés de recyclage considérés.

Commençons par le procédé 1. A l'issue des opérations de démontage et de traitement mécanique, des fractions métalliques et plastiques (Acier, plastique, Cu, Al) sont récupérées et revendues à des filières de valorisation spécialisées. Par conséquent, elles sont considérées comme recyclées à 100% au sens de la directive sur le recyclage des batteries (European

Commission, 2006). Néanmoins, **nous considérons un taux de recyclage de 98% pour l'acier, le cuivre et l'aluminium** pour compter d'éventuelles pertes et souillures. **Pour les matières plastiques, nous considérons un taux de recyclage de 50%**, puisqu'elles sont plus souillées. Pour ces deux premières opérations (démontage et traitement mécanique) les taux de recyclage théoriques sont les taux de recyclage effectifs en industrie.

Concernant l'opération d'hydrométallurgie, nous nous appuyerons sur les taux de recyclage disponibles en bibliographie. Le tableau suivant récapitule les hypothèses dont nous disposons.

	Taux de recyclages et sources
Li	80% Zhang et al. (2005), 81 % (Chen et al., 2015), 90 % (Li et al., 2013), , 99% (Zhang et al., 2015), 90% Recupyl, 90% Toxco
Ni	90% (Gratz et al., 2014), 93% (Zhang et al., 2015), 98% (Chen et al., 2015), 100% (Joulié et al., 2014)
Mn	90 % (Gratz et al., 2014), 90% (Zhang et al., 2015), 97% (Chen et al., 2015)
Co	90 % (Gratz et al., 2014), 90 % (Li et al., 2013), 92% (Zhang et al., 2015), 98% (Chen et al., 2015), 100% (Joulié et al., 2014)
Fe	/
P	/
C	/
Electrolyte	0% (Hoyer et al., 2014)

Tableau B.16. Récapitulatif des hypothèses concernant les taux de recyclage en hydrométallurgie.

Nous constatons que la plupart des travaux se sont intéressés à la technologie NMC. Pour ces dernières, les taux varient entre 80% et 100%. Les taux à 100% représentent des démonstrations à l'échelle du laboratoire, c'est pour ça que nous allons prendre des taux moyens et réalistes. **Nous considérons un taux de recyclage de 90% pour le lithium, nickel, manganèse et cobalt en hydrométallurgie.** Aujourd'hui, seulement le nickel et le cobalt sont effectivement recyclés.

Pour les batteries LFP, nous ne disposons pas de données bibliographiques ou industrielles, considérant l'émergence récente de ces dernières. **Nous supposons, en accord avec des experts, un taux à 90 % pour le fer et 50% pour le phosphore et le graphite.**

Passons maintenant au second procédé (Démontage, pyrométallurgie et hydrométallurgie).

Dans le démontage, nous retrouvons les mêmes taux qu'au premier procédé : 98% pour l'acier, cuivre et aluminium, 50% pour les matières plastiques. Dans les deux dernières opérations (pyrométallurgie et hydrométallurgie), le graphite et les plastiques sont brûlés pour fournir de l'énergie au four de pyrolyse. Pour le reste des métaux (Fe, Al, Cu, Li, Ni, Co, Mn, P), les taux de recyclage théoriques sont supérieurs à 90% (Georgi-Maschler et al., 2012),

95% selon le recycleur Umicore (Umicore, 2010). Dans le procédé d'Umicore, seulement le cuivre, le fer, le nickel et le cobalt sont récupérés dans un alliage pour être traités en hydrométallurgie. L'aluminium, le manganèse et le lithium partent dans les scories pour fabriquer un additif à l'industrie du ciment.

Le tableau suivant récapitule les taux de recyclage que nous adoptons dans notre travail. Les couleurs indiquent le recyclage effectif de chaque matière :

- Blanc : recyclée actuellement et dans l'avenir au taux indiqué
- Jaune : Non recyclée actuellement (0%). La matière peut être recyclée dans l'avenir au taux indiqué
- Marron : Non recyclée actuellement ou dans l'avenir.

		Procédé 1	Procédé 2
		Démontage	Démontage
Commun: NMC & LFP	Acier	98%	98%
	Plastique	50%	50%
	Cu	98%	98%
	Al	98%	98%
		Traitement mécanique	Pyrométallurgie + hydrométallurgie
	Acier	98%	95%
	Plastique	50%	0%
	Cu	98%	95%
	Al	98%	95%
		hydrométallurgie	
	Li	90%	95%
	C	50%	0%
	Electrolyte	0%	0%
NMC	Ni	90%	95%
	Mn	90%	95%
	Co	90%	95%
LFP	Fe	90%	95%
	P	50%	50%

Tableau B.17. Taux de recyclage théoriques dans les deux procédés.

Nous considérons que les variables « recycling rate of Z in process P » sont peu incertaines (-), dont nous fixons les valeurs au tableau ci-dessus. Pour les matières non recyclées actuellement (en jaune dans le tableau), c'est le modèle DS qui déterminera si elles le seront à l'avenir, en fonction des boucles de rétroaction sur leurs criticités et le taux de recyclage réglementaire.

B.4.1.5 Variables du bloc « Criticality »

B.4.1.5.1 « Other Z demand »

Ces variables traduisent la demande en tonnes par année pour les différentes matières présentes dans la BLI (Fe, Al, Cu, Li, Ni, Co, Mn, C, P) ; hors BLIs de VEs en Europe, satisfaite par la production minière. Nous la distinguons de la consommation apparente d'une matière, qui est plus grande et comporte la production minière et le recyclage. **Ainsi, les demandes que nous considérons sont équivalentes aux productions minières.** Pour les demandes actuelles, nous nous sommes appuyés sur les données publiées par l'USGS (US Geological Surveys) (USGS, 2015, 2014, 2013, 2012, 2011, 2010). Le tableau suivant illustre ces dernières.

	2010 (1 000 t / an)	2011 (1 000 t / an)	2012 (1 000 t / an)	2013 (1 000 t / an)	2014 (1 000 t / an)	Evolution moyenne / an
Fe *	2 590 000	2 800 000	2 930 000	3 110 000	3 220 000	5,6%
Cu	15 900	16 100	16 900	18 300	18 700	4,1%
Al	40 800	44 400	45 900	47 600	49 300	4,8%
Li	28,1	34,1	35,0	34,0	36,0	6,4%
Ni	1 590	1 940	2 220	2 630	2 400	10,8%
Mn	13 900	16 000	15 800	16 900	18 000	6,7%
Co	90	109	103	110	112	5,8%
P	181 000	198 000	217 000	225 000	220 000	5,0%
C	925	1 150	1 170	1 110	1 170	6,1%
Plastique						

Tableau B.18. Productions annuelles des matières contenues dans les BLIs selon l'USGS.

* Dans les estimations USGS, la production chinoise (le premier producteur) est exprimée pour un minerai brut et non utilisable. Ainsi, la vraie production en fer s'en retrouve plus petite. Pour 2010, elle est estimée à 1140 Mt dans (Dobbs et al., 2011).

Concernant les futures demandes, le tableau montre des évolutions allant de 4% et 6%, à l'exception du nickel. Même si la consommation apparente des matières continuera à progresser dans le futur, la substitution et le recyclage pourra stabiliser, voire diminuer la production minière.

Nous concluons que ces variables sont très incertaines (+), pour lesquelles nous allons procéder à des analyses de sensibilités. Nous considérons comme valeurs initiales de référence celles de la colonne 2010 du tableau ci-dessus et une évolution entre [0, +5%] par an.

B.4.1.5.2 « Z reserves »

Ces variables traduisent les réserves en tonnes pour les différentes matières présentes dans la BLI (Fe, Al, Cu, Li, Ni, Co, Mn, C, P). **Les réserves sont définies par l'USGS comme la part des ressources connues et économiquement exploitables** (USGS, 2012). Le tableau suivant récapitule les estimations actualisées de l'USGS entre 2010 et 2015.

	2010 (millions t)	2011 (millions t)	2012 (millions t)	2013 (millions t)	2014 (millions t)	Ecart maximum
Fe	87 000	80 000	80 000	81 000	87 000	4,8%
Cu	630	690	680	690	700	7,1%
Al	28 000	29 000	28 000	28 000	28 000	2,8%
Li	13,0	13,0	13,0	13,0	13,5	3,1%
Ni	76	80	75	74	81	4,9%
Mn	630	630	630	570	570	5,9%
Co	7,3	7,5	7,5	7,2	7,2	2,2%
P	65 000	71 000	67 000	67 000	67 000	5,3%
C	71	77	77	130	110	39,8%
Plastique						

Tableau B.19. Estimations des réserves selon l'USGS.

A l'exception du graphite (C), où de nouveaux gisements ont été découverts, nous constatons une faible variation de ces estimations. Ainsi, nous considérons que ces variables sont peu incertaines (-), nous allons fixer leurs valeurs selon le tableau suivant :

	Fe	Cu	Al	Li	Ni	Mn	Co	P	C	Plastique
Réserves (millions t)	87 000	700	28 000	13,5	81	570	7,3	67 000	110	

Tableau B.20. Valeurs adoptées pour les variables « Z reserves »

B.4.1.6 Variables du bloc « CBA of recycling »

B.4.1.6.1 « Les coûts par procédé »

Ces variables traduisent les coûts inhérents à chaque opération de chaque procédé de recyclage. Nous distinguons les coûts d'investissements (Investment cost in process P), les coûts fixes annuels (Fixed cost in process P) et les coûts variables de traitement (Variable cost in process P). En ce qui concerne le procédé P1, les estimations faites dans le cadre du projet Lithorec (Hoyer et al., 2014, 2013) sont les seules dont nous disposons. Le tableau suivant récapitule ces dernières pour de petites et larges unités (modules).

	Petites	Larges
	Capacité Investissement Coût fixe €/an	Capacité Investissement Coût fixe €/an
Démontage	6000 BLI-eq / an	60000 BLI-eq / an
	560 000 €	3 100 000 €
	227 000 € / an	1 020 000 € / an
Traitement mécanique	1500 t / an	15000 t / an
	2 100 000 €	5 240 000 €
	120 000 € / an	255 000 € / an
Traitement Hydro-métallurgique	3300 t / an	33000 t / an
	10 000 000 €	40 000 000 €
	1 350 000 € / an	5 380 000 € / an

Tableau B.21. Estimations Lithorec des coûts et capacités du procédé 1. (Hoyer et al., 2014)

Pour les coûts variables le projet a distingué les BLIs NMC et LFP ainsi que les BLIs VE, VHR et VHY.

Module	Démontage			Traitement mécanique	Traitement Hydro-métallurgique
	NMC & LFP VE	NMC & LFP VHR	NMC & LFP VHY	Cellules NMC & LFP	Black mass NMC & LFP
coût variable petite unité €/ t	193 €	235 €	547 €	250 €	320 €
coût variable large unité €/ t	193 €	235 €	547 €	30 €	130 €

Tableau B.22. Estimations Lithorec des coûts variables du procédé 1. (Hoyer et al., 2014)

Concernant le procédé P2, la seule donnée dont nous avons connaissance est le montant d'investissement pour une unité de pyrolyse d'un montant de 25 M€. Il s'agit de l'unité d'Umicore à Hoboken en Belgique, d'une capacité de 7000 t / an. Ainsi, nous considérons que les estimations de Lithorec pour les unités de démontage et d'hydrométallurgie dans le procédé P1 sont aussi valables pour le procédé P2.

Afin de prendre une capacité moyenne du procédé P1 équivalente à celle du procédé P2, **nous considérons une capacité de traitement de 10 000 t / an dans les deux procédés.** L'extrapolation des coûts des nouvelles capacités n'est pas linéaire, elle est faite à l'aide de la formule suivante : $\text{Coûts 2} / \text{Coûts 1} = (\text{Capacité 2} / \text{capacité 1})^x$, où 'x' est un facteur qui varie entre 0 et 1 en fonction de l'industrie et du produit (Wang et al., 2014b). Le paramètre 'x' peut être estimé à l'aide des capacités et coûts des petites et grandes unités (en inversant l'équation). Puis, les nouveaux coûts des nouvelles capacités peuvent être estimés.

	Petite unité (Lithorec)	Large unité (Lithorec)	Estimation du paramètre 'x'	Nos estimations
	Capacité (t) Investissement Coût fixe €/ an	Capacité (t) Investissement Coût fixe €/ an		Capacité (t) Investissement Coût fixe €/ an
Démontage	2 000	20 000		10 000
	560 000 €	3 100 000 €	0,74	1 856 092 €
	227 000 €	1 020 000 €	0,66	645 536 €
Traitement mécanique	1 500	15 000		6 000 ²⁹
	2 100 000 €	5 240 000 €	0,4	3 632 079 €
	120 000 €	255 000 €	0,33	188 460 €
Traitement Hydro- métallurgique	3 300	33 000		4 000 ³⁰
	10 000 000 €	40 000 000 €	0,6	11 276 845 €
	1 350 000 €	5 380 000 €	0,6	1 516 736 €

Tableau B.23. Nos estimations des coûts et capacités des unités du procédé 1.

Le tableau suivant récapitule l'ensemble des coûts pour les deux procédés.

	Démontage	Traitement mécanique	Traitement hydro- métallurgique	Traitement pyrométallurgique
Investissement	1 850 000 €	3 650 000 €	11 250 000 €	25 000 000 €
Coût fixe €/ an	650 000 €	190 000 €	1 500 000 €	1 300 000 € (*I)
Coût variable €/ t (*2)	350 €	250 €	320 €	250 €

Tableau B.24. Récapitulatif de nos hypothèses pour les coûts inhérents à chaque procédé.

(*I) N'ayant aucune estimation pour le coût fixe d'une unité de pyrolyse, nous avons appliqué le même ratio (coût fixe / Investissement) du traitement mécanique (5%).

(*2) Pour le démontage nous avons pris un coût moyen entre celui des BLIs VE, VHR et VHY. Pour les traitements mécanique et hydro-métallurgique, nous avons gardé les valeurs maximales. Concernant le traitement pyrométallurgique, nous n'avons connaissance d'aucune hypothèse de coût variable. Nous nous sommes encore appuyés sur celui du traitement mécanique.

Nous concluons que les variables 'Investment cost in process P', 'Fixed cost in process P' et 'Variable cost in process P' sont très incertaines (+), pour lesquelles nous allons procéder à des analyses de sensibilités. Nous allons prendre les valeurs du Tableau B.24 comme valeurs de références et un intervalle de variation [0% ; +20%] pour les deux premières et un intervalle de [-20% ; +20%] pour la dernière.

²⁹ 10 000 * % cellules dans le pack (60%).

³⁰ 6 000 * % black mass dans la cellule (67%).

B.4.1.6.2 « Transport cost for recycling »

Cette variable traduit le coût de transport d'une tonne de BLIs vers les unités de recyclage. Les BLIs sont considérées comme des déchets dangereux soumis à un accord relatif au transport international des marchandises dangereuses par route (*Accord for dangerous goods by road = ADR*) (Commission économique pour l'Europe, 1985), cette contrainte implique des conditions de transport spéciales et un coût élevé. Les experts que nous avons rencontrés nous font état d'un coût pouvant varier entre 1000 €/t et 1500 €/t. Dans la littérature, un seul travail a été identifié. Wang et al. (2014b) considère une valeur référence de 1120 \$/t et un maximum de 1600 \$/t.

Ainsi, nous considérons que c'est une variable très incertaine (+), pour laquelle nous allons procéder à des analyses de sensibilités. Nous allons prendre une valeur référence de 1250 €/t et un intervalle de variation [-20% ; +20%].

B.4.1.6.3 « Material Z price »

Cette variable traduit l'évolution du prix d'une matière présente dans une BLI par tonne (Fe, Al, Cu, Li, Ni, Co, Mn, C, P et plastiques). Concernant les prix actuels, nous nous sommes appuyés sur deux sources : (i) Lorsqu'ils sont disponibles dans des revues spécialisées (**Le recycleur**) pour le prix de revente des matières recyclées (acier, plastique, Cu, Al et Fe), (ii) Sinon, les prix LME (London Metal Exchange) auxquels nous avons appliqués une réduction de 15% (c'est la règle communiquée par les experts que nous avons rencontrés). Le tableau suivant illustre ces derniers.

	Acier	Plastique	Cu	Al	Li	Ni	Mn	Co	Fe	P	C
Prix 2010 €/ Tonne	200	250	4 600	1 350	705	11 246	1 406	18 743	500	70	-

Tableau B.25. Prix de revente des matières recyclées en 2010.

Concernant ces futurs prix, trois scénarios d'évolution sont considérés dans le projet Lithorec : prix stables, une augmentation modérée et une augmentation franche pour les différentes matières (Hoyer et al., 2014).

Nous concluons que ces variables sont très incertaines (+), pour lesquelles nous allons procéder à des analyses de sensibilités. Nous considérons comme valeurs initiales de référence celles du tableau ci-dessus et une évolution entre [0, +3%] par an.

B.4.1.7 Variables du bloc « CBA of repurposing »

B.4.1.7.1 « Les coûts par unité de reconditionnement »

Ces variables traduisent les coûts inhérents à chaque unité de reconditionnement. Nous distinguons le coût d'investissements (Investment cost in repurposing), le coût fixe annuel (Fixed cost in repurposing) et le coût variable de reconditionnement (Variable cost in repurposing).

Cready et al (2003) ont estimé un coût de reconditionnement global de 62,25 \$/kWh, il inclut la rentabilisation de l'investissement initial au bout de 5 ans (6,8 \$/kWh), le Coût fixe (36,5 \$/kWh) et le Coût variable (22 \$/kWh). Dans le cadre du projet NREL sur la 2^{nde} vie (2.2.2), Neubauer et al., (2012) ont actualisé les calculs entrepris par (Cready et al., 2003). Ils ont considéré des coûts dépendant de la taille (capacité) des éléments reconditionnés. Cela traduit la profondeur du procédé de reconditionnement. Plus la taille de ces éléments est petite, plus on s'approche d'un reconditionnement au niveau de la cellule et seront importants les investissements et les coûts correspondants. Inversement, on s'approche d'un reconditionnement au niveau du module et du pack.

En s'appuyant sur les coûts unitaires fournis dans (Neubauer et al., 2012), nous avons calculé le montant d'investissement, coût fixe et variable pour une taille d'éléments de 2 kWh, 4 kWh, 10 kWh et 20 kWh. Le tableau suivant récapitule ces résultats et illustre également les données de (Cready et al., 2003).

Variable	(Cready et al., 2003)	(Neubauer et al., 2012)				Moyenne 4, 10, 20 kWh	Ecart
		taille (capacité) des éléments reconditionnés					
		2 kWh	4 kWh	10 kWh	20 kWh		
Investissement \$	1 299 778	1 227 097	1 143 457	1 123 737	1 107 777	1 124 990	2%
Coût fixe \$ / an	2 664 315	1 821 921	1 446 063	1 130 599	1 001 900	1 192 854	21%
Coût variable \$/kWh	22	37	27	21	19	22	21%
Capacité kWh / an	73 000	115 000					

Tableau B.26. Récapitulatif des hypothèses de coûts de reconditionnement.

Nous concluons que les variables « Investment cost in repurposing », « Fixed cost in repurposing » et « Variable cost in repurposing » sont incertaines (+), pour lesquelles nous allons procéder à des analyses de sensibilités. Nous allons prendre les moyennes (4, 10 et 20 kWh) du tableau ci-dessus comme valeurs de références. Cela est équivalent en euro

à (851 681 €, 903 058 € et 17€). Nous allons considérer un intervalle de variation [0% ; +20%] pour les trois variables.

B.4.1.7.2 « Transport cost for repurposing »

Cette variable traduit le coût de transport d'un kWh de BLIs vers les unités de reconditionnement. Nous rappelons que les BLIs sont considérées comme des déchets dangereux soumis à l'accord ADR, ce qui implique un coût élevé. Ainsi, nous considérons un même coût de transport pour le recyclage et le reconditionnement, à savoir une valeur référence de 1250 €/t et un intervalle de variation [-20% ; +20%]. Considérant le rapport 'kg/kWh' (B.4.1.3.4), nous déduisons qu'il y a 80 kWh dans 1 tonne de BLIs (1 000 / 12,5). Par conséquent, un coût de transport référence à 16 €/kWh.

Nous concluons que c'est une variable très incertaine (+), pour laquelle nous allons procéder à des analyses de sensibilités. Nous allons prendre une valeur référence de 16 €/kWh et un intervalle de variation [-20% ; +20%].

B.4.1.7.3 « New LIB price »

Cette variable traduit le prix des futures BLIs par kWh. Nous l'avons introduite avec la variable suivante (Rep. / New LIB price) pour le calcul des prix des batteries reconditionnées. Il s'agit de l'hypothèse prise dans le projet NREL sur la 2^{nde} vie et qui repose sur le postulat suivant (Neubauer and Pesaran, 2011; Neubauer et al., 2012). Lorsqu'elles arriveront sur le marché, le premier compétiteur des BLIs reconditionnées seront les nouvelles BLIs. Considérant leurs faibles capacités et durées de vies par rapport aux neuves, le prix d'une BLI reconditionnée doit être un minimum moins cher que celui d'une neuve d'un pourcentage (Rep. / New LIB price). Il est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$\text{Repurposed LIB price} = \text{New LIB price} * \text{Rep./ New LIB price}$$

Le tableau suivant récapitule les hypothèses dont nous disposons pour l'évolution du prix des BLIs. Les chiffres sont exprimés en \$/kWh.

		2015	2020	2025
(Avicenne Energy, 2014)		390	250	
(Hein et al., 2012)		330	225	185
(Lux Research, 2015)	Tesla	265	195	172
	BYD	295	240	221
	AESC-Nissan	340	260	230
	General Motors	360	230	200
Moyenne		330	233	202
Ecart supérieur		18%	11%	14%
Ecart inférieur		-20%	-16%	-15%

Tableau B.27. Récapitulatif des hypothèses concernant l'évolution du prix des BLIs.

Ainsi, nous considérons que cette variable est incertaine (+), pour laquelle nous allons procéder à des analyses de sensibilité. Nous allons prendre comme valeur de référence la moyenne. Cela est équivalent en euro à (2015 = 250 €/kWh, 2020= 175 €/kWh et 2025 = 152 €/kWh). A partir de 2025, nous supposons un prix stable, où il n'y a plus d'effet volume ou recherche et développement. Nous considérons un intervalle de variation [-20% ; +20%].

B.4.1.7.4 « Rep. / New LIB price »

Cette variable traduit le rapport entre le prix d'une BLI reconditionnée et une BLI neuve, il est compris entre 0 et 1. Nous l'avons introduite pour le calcul des prix des BLIs reconditionnées à l'aide de la formule ci-dessus. Cette variable a été estimée dans le cadre du projet NREL en considérant deux paramètres :

- Un facteur de santé de la batterie en 2^{nde} vie
- Un malus associé à l'achat d'un objet de seconde main, qui peut être un facteur psychologique ou une assurance risque (Caumon, 2011).

Ces deux paramètres ont été estimés à 40% et 0,75 respectivement, ce qui donne une estimation de la variable 'Rep. / New LIB price' à 30% (Neubauer and Pesaran, 2011; Neubauer et al., 2012). **Ainsi, nous considérons que c'est une variable peu incertaine (-), dont nous fixons la valeur à 30%.**

B.4.2 Diagrammes stock & flux et caractérisation des variables endogènes

Dans cette section, nous nous intéressons aux variables endogènes. Pour chaque bloc du modèle, nous allons illustrer les diagrammes stock & flux et les équations entre les variables.

Nous rappelons la vue globale du modèle dans la figure suivante.

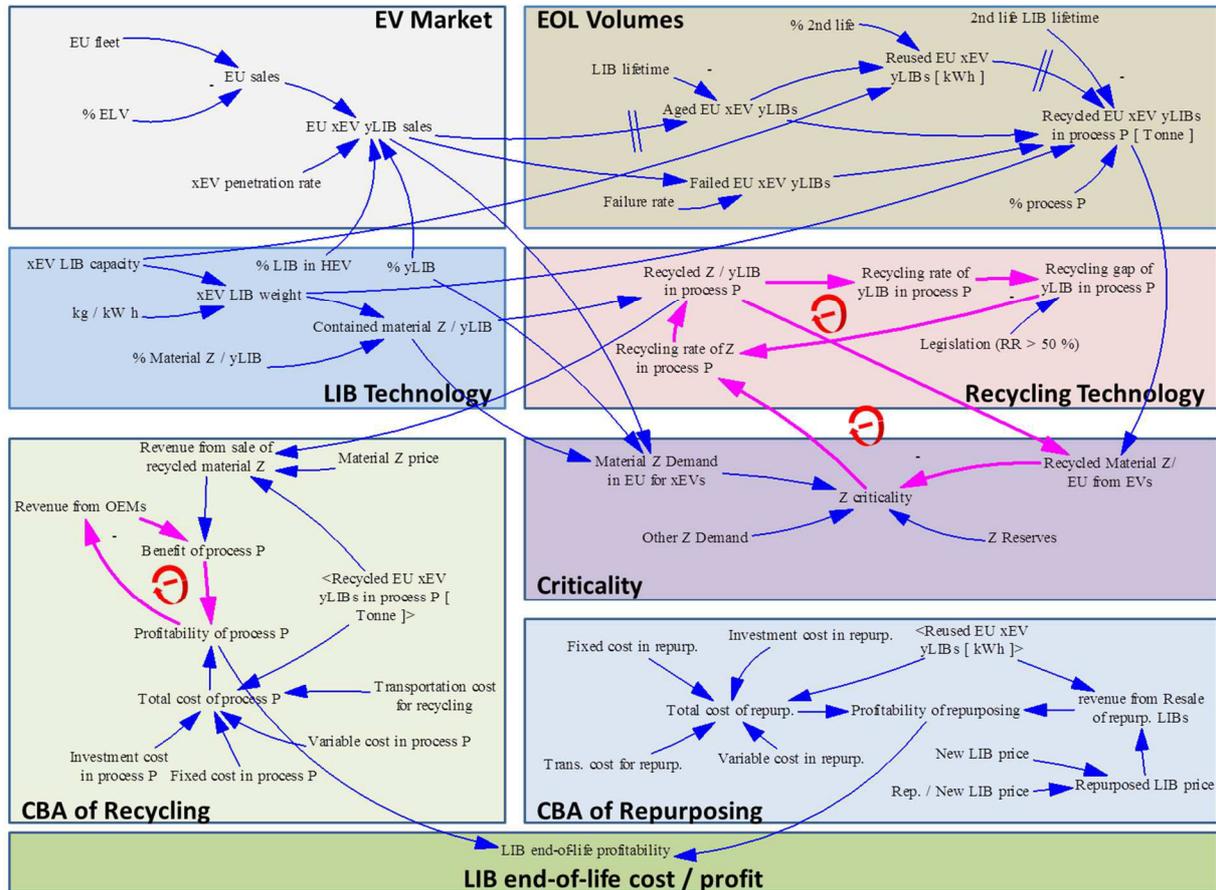


Figure B.11. Vue globale du modèle DS.

Pour chacun des diagrammes que nous allons montrer, les variables exogènes exposées dans la section précédente (B.1) seront mises en **marron**. Les résultats intermédiaires ou finaux importants que notre modèle permet de calculer seront mis en **vert**. Dans certains cas, nous allons montrer juste une partie des diagrammes et des équations afin de ne pas encombrer les figures et les tableaux, le reste se déduit facilement, en remplaçant souvent NMC par LFP, EV par PHEV/HEV et une matière donnée par les autres matières.

B.4.2.1 Bloc « EV Market »

La figure suivante illustre le diagramme stock & flux de ce bloc de variables.

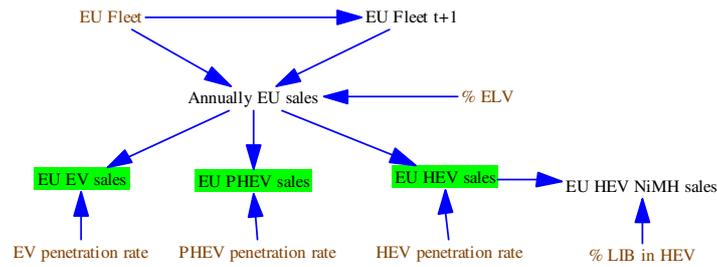


Figure B.12. Diagramme stock & flux du bloc « EV Market ».

Les ventes annuelles sont déduites en fonction de l'évolution du parc automobile d'une année à l'autre et la mortalité des véhicules. Une fois les ventes annuelles calculées, les ventes de VE (EV), VHR (PHEV) et VHY (HEV) sont calculées en fonction des taux de pénétrations définis. Le tableau suivant récapitule les équations entre les variables endogènes.

Variable	Equation	Unité
EU Fleet t+1	Delay Fixed (EU Fleet, 1, 0)	Veh. /an
Annually EU sales	IF THEN ELSE(Time =0, 1.34382e+007, IF THEN ELSE(Time =1, 1.33729e+007, IF THEN ELSE(Time =2, 1.20518e+007, IF THEN ELSE (Time =3, 1.18733e+007, IF THEN ELSE(Time =4, 1.25415e+007, EU Fleet - "EU Fleet t+1" + (EU Fleet * "% ELV")))))))	Veh. /an
EU EV sales	Annually EU sales * EV penetration rate	Veh. /an
EU PHEV sales	Annually EU sales * PHEV penetration rate	Veh. /an
EU HEV sales	Annually EU sales * HEV penetration rate	Veh. /an
EU HEV NiMH sales	EU HEV sales*(1-"% LIB in HEV")	Veh. /an

Tableau B.28. Equations définissant les variables endogènes du bloc « EV Market ».

B.4.2.2 Bloc « EOL Volumes »

La figure suivante illustre le diagramme stock & flux de ce bloc de variables. Il s'agit de la partie concernant les BLIs NMC. Le diagramme stock & flux des BLIs LFP est équivalent à celui des NMC (il suffit de remplacer NMC par LFP).

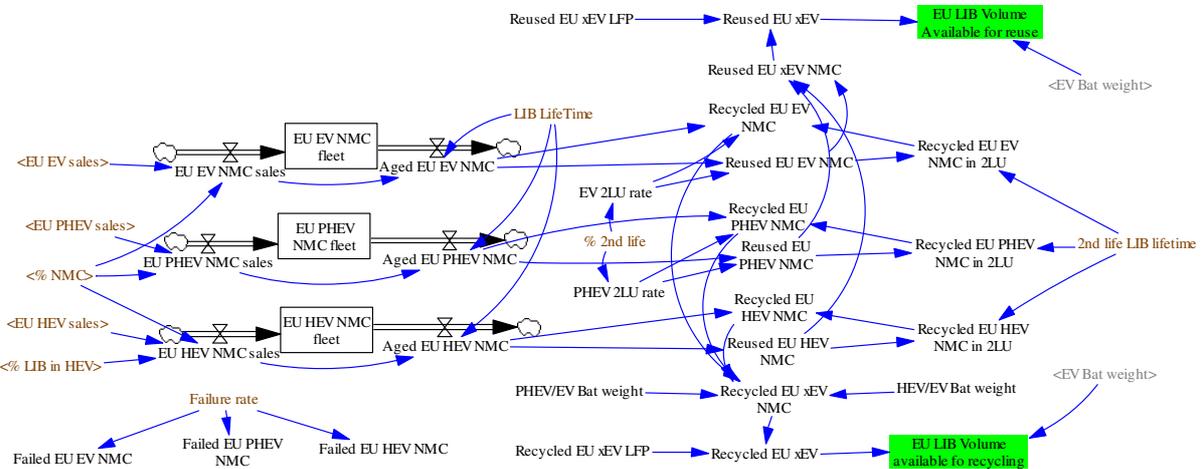


Figure B.13. Diagramme stock & flux du bloc « EOL Volumes ».

En fonction des ventes VE, VHR et VHY et de la durée de vie BLI, les batteries NMC arrivent en fin de vie. En fonction du % 2nde vie, elles sont divergées soit en reconditionnement ou en recyclage. Le volume total disponible pour le recyclage est la somme des volumes NMC et LFP, qui à leurs tours, sont la somme des volumes NMC VE, NMC VHR et NMC VHY. De la même manière, le volume disponible pour la réutilisation est la somme des volumes à reconditionner NMC et LFP. Le tableau suivant récapitule les équations entre les variables endogènes.

Variable	Equation	Unité
EU EV NMC sales	EU EV sales * "% NMC"	Vah. / an
EU EV NMC fleet	Level (EU EV NMC sales - Aged EU EV NMC, 0)	Vah. / an
Aged EU EV NMC	Delay Fixed (EU EV NMC sales, LIB LifeTime, 0)	Vah. / an
EV 2LU rate	IF THEN ELSE(Time <9, 0, "% 2 nd life")	%
Reused EU EV NMC	Aged EU EV NMC * EV 2LU rate	Vah. / an
Recycled EU EV NMC in 2LU	Delay Fixed (Reused EU EV NMC, "2 nd life LIB Lifetime", 0)	Vah. / an
Failed EU EV NMC	EU EV NMC fleet * Failure rate	Vah. / an
Recycled EU EV NMC	Aged EU EV NMC * (1-EV 2LU rate) + Recycled EU EV NMC in 2LU + Failed EU EV NMC	Vah. / an
PHEV/EV Bat weight	PHEV Bat weight / EV Bat weight	%
HEV/EV Bat weight	HEV Bat weight / EV Bat weight	%
Recycled EU xEV NMC	Recycled EU EV NMC + ("PHEV/EV Bat weight" * Recycled EU PHEV NMC) + ("HEV/EV Bat weight" * Recycled EU HEV NMC)	Vah. / an
Recycled EU xEV LFP	Recycled EU EV LFP+ ("HEV/EV Bat weight" * Recycled EU HEV LFP) + ("PHEV/EV Bat weight" * Recycled EU PHEV LFP)	Vah. / an
Recycled EU xEV	Recycled EU xEV LFP + Recycled EU xEV NMC	Vah. / an
EU LIB Volume available fo recycling	(Recycled EU xEV * EV Bat weight) / 1000	Tonne
Reused EU xEV NMC	Reused EU EV NMC + ("PHEV/EV Bat weight" * Reused EU PHEV NMC) + ("HEV/EV Bat weight" * Reused EU HEV NMC)	Vah. / an
Reused EU xEV LFP	Reused EU EV LFP+("HEV/EV Bat weight" * Reused EU HEV LFP)+("PHEV/EV Bat weight" * Reused EU PHEV LFP)	Vah. / an
Reused EU xEV	Reused EU xEV LFP + Reused EU xEV NMC	Vah. / an
EU LIB Volume Available for reuse	(Reused EU xEV * EV Bat weight) / 1000	Tonne

Tableau B.29. Equations définissant les variables endogènes du bloc « EOL Volumes».

B.4.2.3 Bloc « LIB Technology »

A l'instar du diagramme précédent, le diagramme suivant concerne la partie NMC. Le diagramme de la BLI LFP se déduit facilement, en remplaçant la composition de la masse active par les matières la composant (Li, Fe et P).

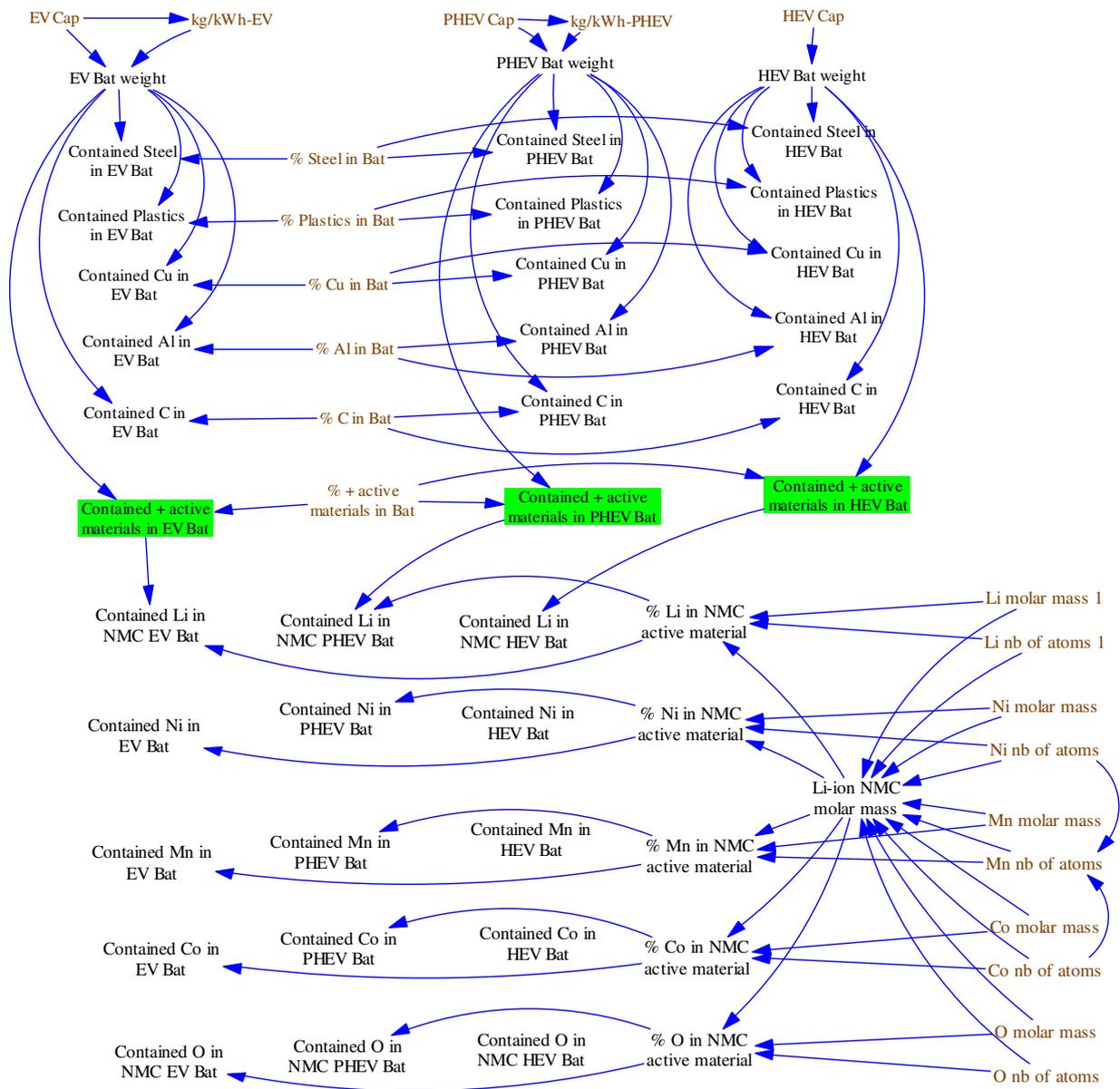


Figure B.14. Diagramme stock & flux du bloc « LIB Technology ».

Les poids des BLIs VE, VHR et VHY sont calculées en fonction des capacités et de la variable « kg / kWh ». Les proportions des différents éléments de la BLI nous permettent de calculer leurs poids dans la BLI. Le contenu de la masse active positive est calculé dans le bas de la figure, en utilisant sa formule chimique (B.4.1.3.5, Tableau B.13). Le tableau suivant récapitule les équations entre les variables endogènes.

Variable	Equation	Unité
EV Bat weight	EV Cap * "kg/kWh-EV"	Kg
Contained Steel in EV Bat	"% Steel in Bat" * EV Bat weight	kg / LIB
Contained + active materials in EV Bat	% + active materials in Bat * EV Bat weight	Kg / LIB
Li-ion NMC molar mass	(Co molar mass * Co nb of atoms) + (Li molar mass 1 * Li nb of atoms 1) + (Mn molar mass * Mn nb of atoms) + (Ni molar mass * Ni nb of atoms) + (O molar mass * O nb of atoms)	g / mol
% Li in NMC active material	Li nb of atoms 1 * Li molar mass 1 / "Li-ion NMC molar mass"	%
Contained Li in NMC EV Bat	"% Li in NMC active material" * "Contained + active materials in EV Bat"	kg / LIB

Tableau B.30. Equations définissant les variables endogènes du bloc « LIB Technology ».

B.4.2.4 Bloc « Criticality »

La figure suivante illustre une partie du diagramme stock & flux de ce bloc de variables afin de le rendre lisible. Il s'agit de celle du cobalt. 8 autres diagrammes similaires (Li, Ni, Mn, Cu, Al, C, Fe, P) ont été construits dans notre modèle.

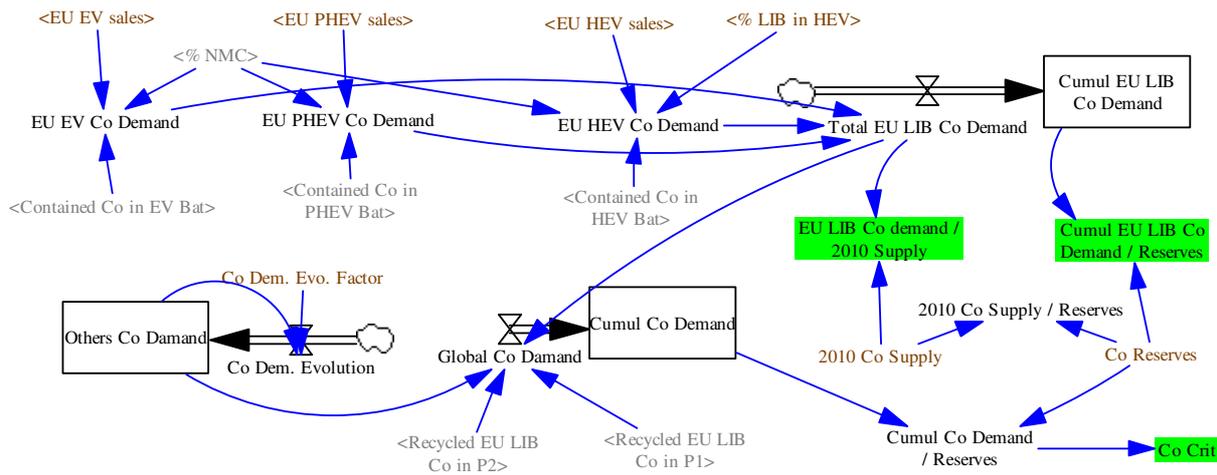


Figure B.15. Zoom sur le cobalt dans le diagramme stock & flux du bloc « Criticality ».

Le cumul de la demande en cobalt pour les BLIs EU est calculé en premier, il est comparé aux réserves (*Cumul EU LIB Co Demand / Reserves*) pour analyser l'effet des BLIs EU sur la criticité des matières. En additionnant la reste des demandes en cobalt et soustrayant l'effet du recyclage, la consommation globale des réserves est estimée (*Cumul Co Demand / Reserves*). Cette dernière est transformée en un indice de criticité (*Co crit*), **c'est cette dernière que nous avons utilisée dans l'analyse de sensibilité (3.2.2.4)**. Le tableau suivant récapitule les équations entre les variables endogènes.

Variable	Equation	Unité
EU EV Co Demand	Contained Co in EV Bat * EU EV sales * "% NMC" / 1000	Tonne
Total EU LIB Co Demand	EU EV Co Demand + EU HEV Co Demand + EU PHEV Co Demand	Tonne
Cumul EU LIB Co Demand	Level (Total EU LIB Co Demand, 0)	Tonne
2010 Co Supply / Reserves	"2010 Co Supply" / Co Reserves * 100	%
EU LIB Co demand / 2010 Supply	Total EU LIB Co Demand / "2010 Co Supply" * 100	%
Cumul EU LIB Co Demand / Reserves	Cumul EU LIB Co Demand / Co Reserves * 100	%
Co Dem. Evolution	"Co Dem. Evo. Factor" * Others Co Damand	Tonne
Others Co Damand	Level ("Co Dem. Evolution", 2010 Co Supply)	Tonne
Global Co Damand	Others Co Damand + Total EU LIB Co Demand - (Recycled EU LIB Co in P1 + Recycled EU LIB Co in P2)	Tonne
Cumul Co Demand	Level (Global Co Damand, 0)	Tonne
Recycled EU LIB Co in P1	EU Auto NMC Volume Available in P1 * Recycled Co in EV Bat in P1/EV Bat weight	Tonne
Cumul Co Demand / Reserves	Cumul Co Demand/Co Reserves * 100	%
Co Crit	IF THEN ELSE("Cumul Co Demand / Reserves" / 10 >10, 10, "Cumul Co Demand / Reserves" / 10)	0 - 10

Tableau B.31. Equations définissant les variables endogènes du bloc « Criticality ».

B.4.2.5 Bloc « Recycling Technology »

La figure suivante illustre le diagramme stock & flux de ce bloc de variables. Il s'agit du recyclage des BLIs NMC dans le procédé P1. Ce diagramme est similaire aux trois restants (LFP-P1, NMC-P2 et LFP-P2), il suffit de remplacer les matières de la BLI ou les opérations du procédé.

Dans le haut de la figure, nous avons les quatre matières récupérées après les deux premières opérations (démontage, traitement mécanique). Au milieu de la figure, nous avons les matières de la black mass récupérées à l'hydrométallurgie. Le cobalt et le nickel seront toujours recyclés, le lithium, manganèse et graphite seront recyclés s'ils devenaient critiques, ou si le taux de recyclage de la BLI est inférieur à 50%. Dans ce dernier cas, la matière qui contribue le plus au taux de recyclage sera recyclée en priorité.

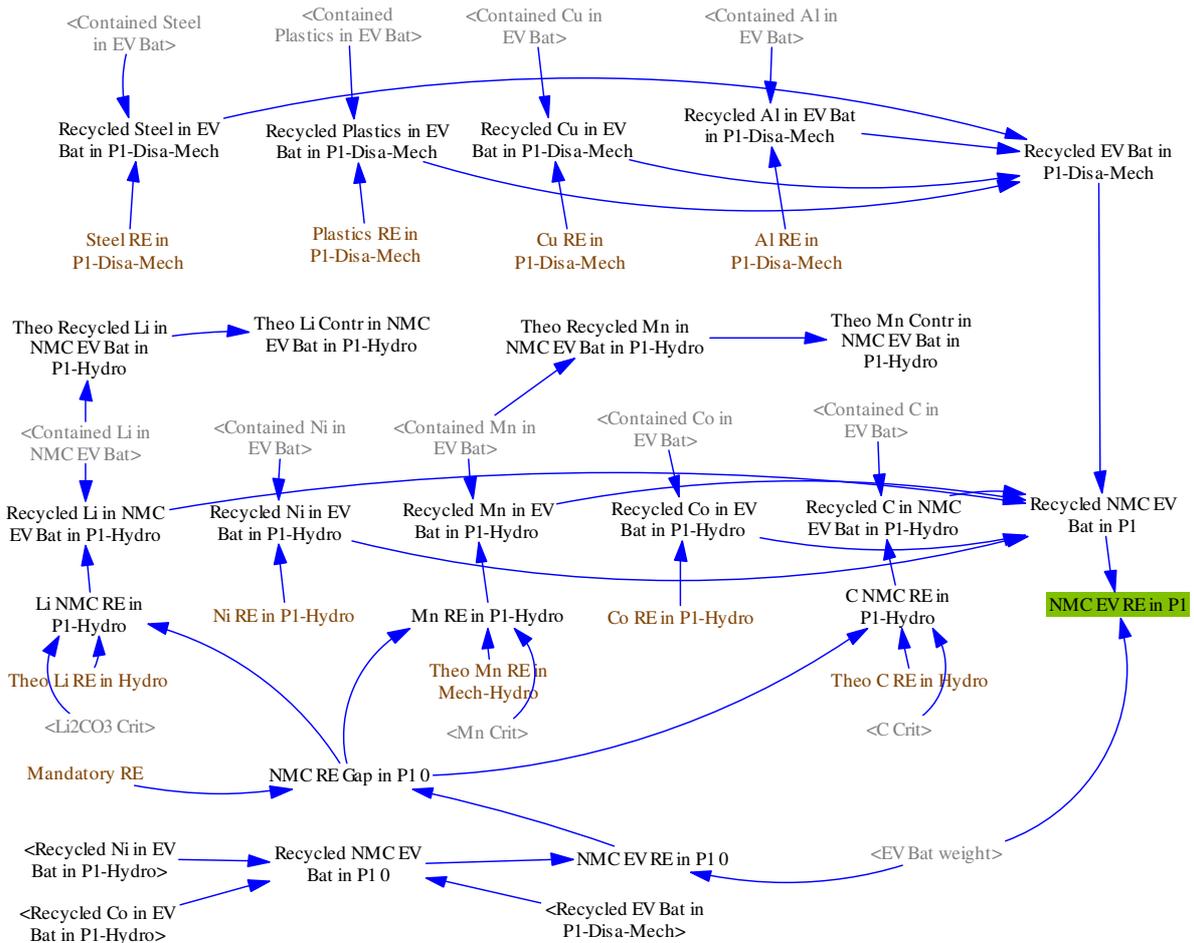


Figure B.16. Diagrammes stock & flux du bloc « Recycling Technology ».

Le tableau suivant récapitule les équations entre les variables endogènes.

Variable	Equation	Unité
Recycled Steel in EV Bat in P1-Disa-Mech	Contained Steel in EV Bat * "Steel RE in P1-Disa-Mech"	kg / BLI
Recycled EV Bat in P1-Disa-Mech	"Recycled Al in EV Bat in P1-Disa-Mech" + "Recycled Cu in EV Bat in P1-Disa-Mech" + "Recycled Steel in EV Bat in P1-Disa-Mech" + "Recycled Plastics in EV Bat in P1-Disa-Mech"	kg / BLI
Li NMC RE in P1-Hydro	IF THEN ELSE(Li2CO3 Crit>5, Theo Li RE in Hydro, IF THEN ELSE(NMC RE Gap in P1 0>=0, 0, Theo Li RE in Hydro, 0))	kg / BLI
Recycled Li in NMC EV Bat in P1-Hydro	Contained Li in NMC EV Bat * "Li NMC RE in P1-Hydro"	kg / BLI
Recycled NMC EV Bat in P1	Recycled Li in NMC EV Bat in P1-Hydro + "Recycled Mn in EV Bat in P1-Hydro" + "Recycled Ni in EV Bat in P1-Hydro" + "Recycled C in NMC EV Bat in P1-Hydro" + "Recycled Co in EV Bat in P1-Hydro" + "Recycled EV Bat in P1-Disa-Mech"	kg / BLI
NMC EV RE in P1	"Recycled NMC EV Bat in P1" / EV Bat weight	%
Recycled NMC EV Bat in P1 0	Recycled Co in EV Bat in P1-Hydro + "Recycled EV Bat in Disa-Mech" + "Recycled Ni in EV Bat in P1-Hydro"	kg / BLI
NMC EV RE in P1 0	Recycled NMC EV Bat in P1 0 / EV Bat weight	%
NMC RE Gap in P1 0	NMC EV RE in P1 0 - Mandatory RE	%
Theo Recycled Li in NMC EV Bat in P1-Hydro	Contained Li in NMC EV Bat * Theo Li RE in Hydro	kg / BLI
Theo Li Contr in NMC EV Bat in P1-Hydro	Theo Recycled Li in NMC EV Bat in P1-Hydro / EV Bat weight	%

Tableau B.32. Equations définissant les variables endogènes du bloc « Recycling Technology ».

B.4.2.6 Bloc « CBA of Recycling »

Pour ce bloc, nous allons montrer deux diagrammes stock & flux, un premier concernant le revenu de revente des matières recyclées et un second sur la rentabilité du recyclage. La figure suivante illustre le revenu de revente des matières recyclées dans P1.

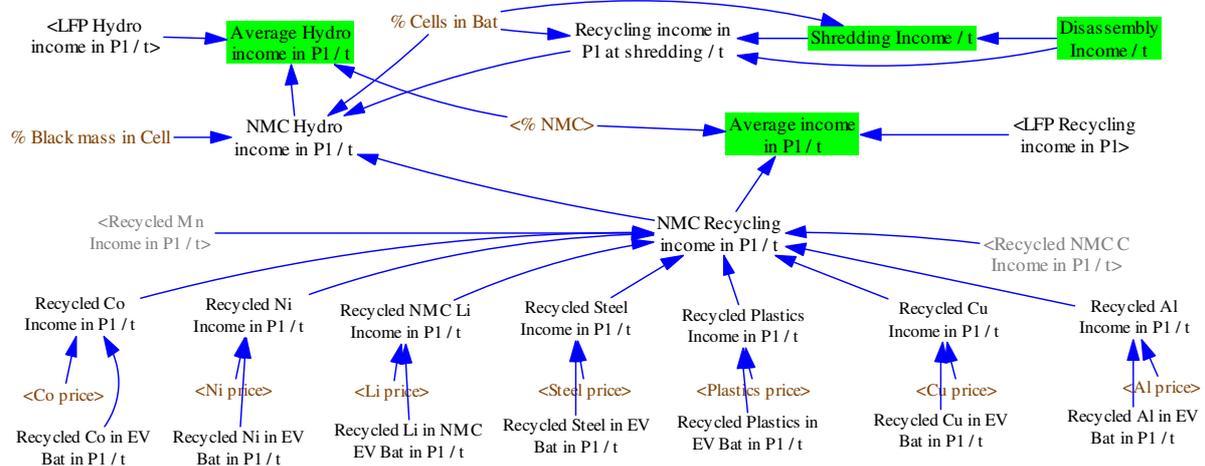


Figure B.17. Diagrammes stock & flux du bloc « CBA of Recycling » concernant le revenu de recyclage.

Pour chaque matière, en fonction de sa quantité recyclée/BLI et de son prix, nous calculons le revenu de son recyclage. Le revenu de recyclage de la BLI NMC est obtenu en additionnant tous les revenus matières. En procédant de la même façon pour les BLIs LFP et en pondérant par le %NMC, nous calculons le revenu moyen de recyclage dans P1. Le revenu de recyclage par opération est calculé en considérant uniquement les matières recyclées à cette opération. Le tableau suivant récapitule les équations entre les variables endogènes.

Variable	Equation	Unité
Recycled Co in EV Bat in P1 / t	"Recycled Co in EV Bat in Mech-Hydro" / EV Bat weight	Tonne
Recycled Co Income in P1 / t	"Recycled Co in EV Bat in P1 / t" * Co price	€ / Tonne
NMC Recycling income in P1 / t	"Recycled Al Income in P1 / t" + "Recycled Co Income in P1 / t" + "Recycled Cu Income in P1 / t"+"Recycled Mn Income in P1 / t" + "Recycled Ni Income in P1 / t" + "Recycled NMC C Income in P1 / t" + "Recycled NMC Li Income in P1 / t" + "Recycled Plastics Income in P1 / t" + "Recycled Steel Income in P1 / t"	€ / Tonne
Average income in P1 / t	("% NMC"*"NMC Recycling income in P1 / t") + ((1- "% NMC")*LFP Recycling income in P1)	€ / Tonne
Disassembly Income / t	("Recycled Al Income in P1 / t"*"% Al at disassembly") + ("Recycled Cu Income in P1 / t"*"% Cu at disassembly") + ("Recycled Plastics Income in P1 / t"*"% Plastics at disassembly") + ("Recycled Steel Income in P1 / t"*"% Steel at disassembly")	€ / Tonne
Shredding Income / t	((("Recycled Al Income in P1 / t" + "Recycled Cu Income in P1 / t" + "Recycled Plastics Income in P1 / t" + "Recycled Steel Income in P1 / t") - "Disassembly Income / t") / "% Cells in Bat"	€ / Tonne
Recycling income in P1 at shredding / t	"Disassembly Income / t" + ("Shredding Income / t" * "% Cells in Bat")	€ / Tonne

NMC Hydro income in P1 / t	("NMC Recycling income in P1 / t" - "Recycling income in P1 at shredding / t") / ("% Black mass in Cell" * "% Cells in Bat")	€ / Tonne
Average Hydro income in P1 / t	("% NMC" * "NMC Hydro income in P1 / t") + ((1 - "% NMC") * "LFP Hydro income in P1 / t")	€ / Tonne

Tableau B.33. Equations définissant les variables endogènes du bloc « CBA of Recycling ».

Passons à présent à la rentabilité de l'activité de recyclage.

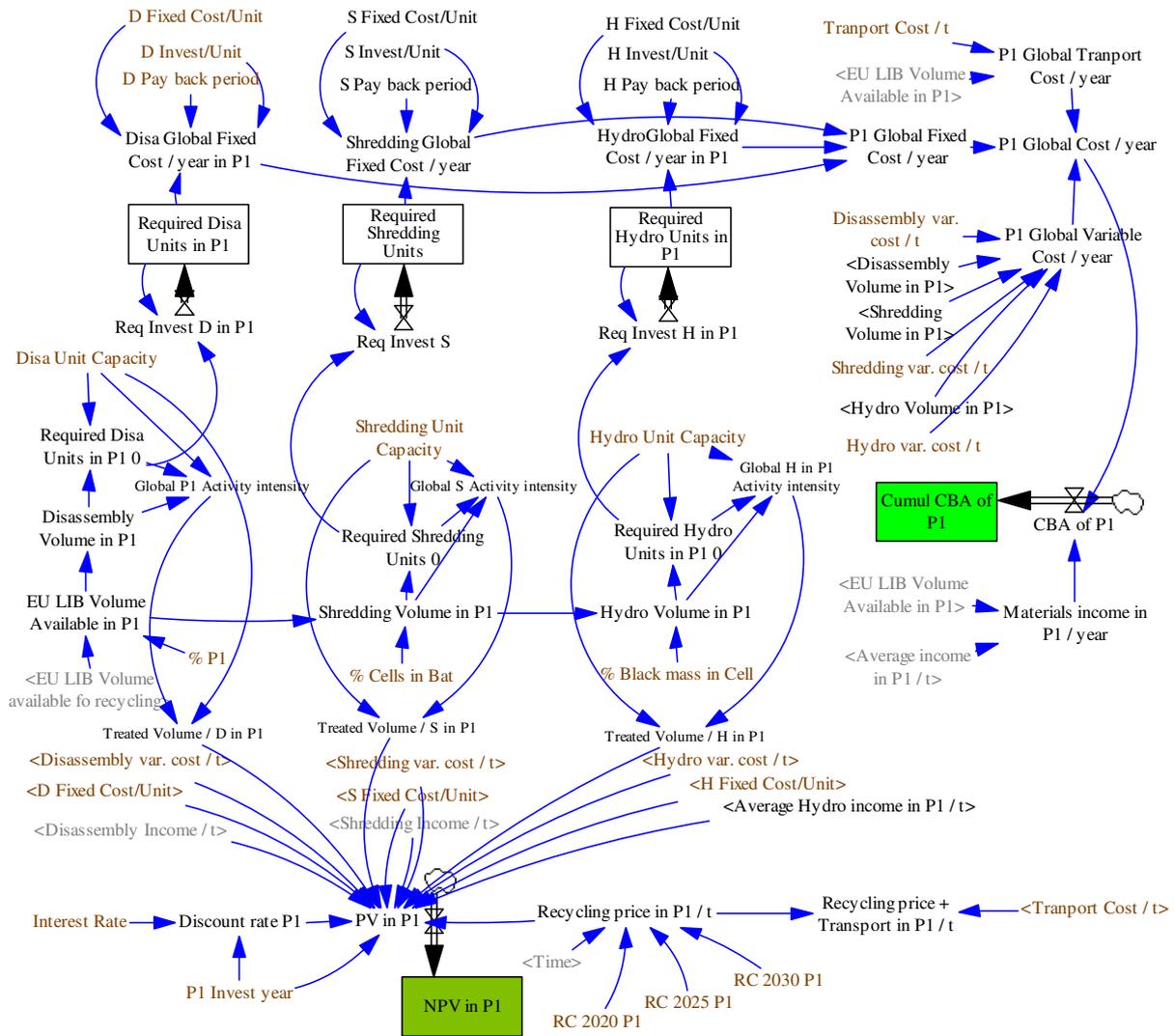


Figure B.18. Diagramme stock & flux du bloc « CBA of Recycling » concernant la rentabilité.

Au milieu de la figure, le volume disponible ainsi que l'intensité de l'activité sont estimés pour les trois opérations de P1 : **D** pour démontage (disassembly), **S** pour le traitement mécanique (Shredding) et **H** pour l'hydrométallurgie. En haut à droite de la figure, la différence coûts-bénéfices globale (pour toutes les unités depuis 2010) dans P1 est calculée (*Cumul CBA of P1*). En bas de la figure, la valeur actuelle nette pour une unité de P1, dans un intervalle de temps donné, est estimée (*NPV in P1*).

La variable « *Cumul CBA of P1* » a été introduite juste pour les besoins de l'analyse de sensibilité (3.2.2.4), puisqu'elle permet d'additionner la rentabilité de toutes les unités et toutes les périodes, ce qui n'était pas possible avec la variable « *NPV in P1* ». « *Cumul CBA of P1* » est plutôt une approximation de la différence coûts-bénéfices globale, les cash-flows ne sont pas actualisés et les investissements sont amortis sur une période prédéfinie. Le revenu depuis les constructeurs n'est également pas considéré dans cette variable.

Pour le calcul de « *Cumul CBA of P1* », le nombre des unités pour les trois opérations de P1, par conséquent les coûts fixes, sont estimés en premier. Ces derniers incluent les coûts fixes annuels ainsi que l'amortissement des investissements. Ensuite, le coût global dans P1 est calculé en additionnant le coût de transport et de traitement dans les unités (coût variable dans les trois opérations). Enfin, la différence coûts-bénéfices globale est calculée en intégrant le revenu de revente des matières recyclées.

Pour le calcul de « *NPV in P1* », le volume traité dans les trois opérations est estimé en premier. Ensuite, les cash-flows provenant de ces trois opérations sont comptabilisés, ils incluent les coûts fixes annuels, les coûts variables de recyclage est les revenus de ventes des matières recyclées. Les investissements sont comptabilisés en début de période (*P1 Invest year*). Les variables « *RC 2020 P1* », « *RC 2025 P1* » et « *RC 2030 P1* » font référence au revenu depuis les constructeurs, elles sont estimées d'une manière à garantir une rentabilisation des investissements sur une période qui est de l'ordre de 5 ans, et une productivité du capital de l'ordre de 2 sur 20 ans. Enfin, le coût de recyclage qui sera supporté par le constructeur est calculé (*Recycling price + Transport in P1 / t*).

Le tableau suivant récapitule les équations entre les variables endogènes.

Variable	Equation	Unité
EU LIB Volume Available in P1	EU LIB Volume available fo recycling * "% P1"	Tonne
Disassembly Volume in P1	EU LIB Volume Available in P1	Tonne
Global P1 Activity intensity	Disassembly Volume in P1 / (Required Disa Units in P1 0 * Disa Unit Capacity)	%
Shredding Volume in P1	EU LIB Volume Available in P1 * "% Cells in Bat"	Tonne
Hydro Volume in P1	Shredding Volume in P1 * "% Black mass in Cell"	Tonne
Required Disa Units in P1 0	1+ INTEGER(Disassembly Volume in P1 / Disa Unit Capacity)	Sans
Req Invest D in P1	IF THEN ELSE(Required Disa Units in P1 0>Required Disa Units in P1, Required Disa Units in P1 0-Required Disa Units in P1, 0)	Sans
Required Disa Units in P1	Level (Req Invest D in P1, 1)	Sans
Disa Global Fixed Cost / year in P1	Required Disa Units in P1* ("D Fixed Cost/Unit"+ ("D Invest/Unit"/D Pay back period))	€ / an
P1 Global Fixed Cost / year	"Disa Global Fixed Cost / year in P1" + "HydroGlobal Fixed Cost / year in P1" + "Shredding Global Fixed Cost / year"	€ / an

P1 Global Transport Cost / year	EU LIB Volume Available in P1 * "Transport Cost / t"	€ / an
P1 Global Variable Cost / year	(Disassembly Volume in P1*"Disassembly var. cost / t") + (Shredding Volume in P1*"Shredding var. cost / t") + (Hydro Volume in P1*"Hydro var. cost / t")	€ / an
P1 Global Cost / year	"P1 Global Fixed Cost / year" + "P1 Global Variable Cost / year" + "P1 Global Transport Cost / year"	€ / an
Materials income in P1 / year	"Average income in P1 / t" * EU LIB Volume Available in P1	€ / an
CBA of P1	"Materials income in P1 / year" - "P1 Global Cost / year"	€ / an
Cumul CBA of P1	Level (CBA of P1, 0)	€
Discount rate P1	IF THEN ELSE(Time <P1 Invest year, 1, (1+Interest Rate)^(P1 Invest year - Time))	%
Recycling price in P1 / t	IF THEN ELSE(Time <15, RC 2020 P1, IF THEN ELSE(Time <20, RC 2025 P1, RC 2030 P1))	€ / t
PV in P1	IF THEN ELSE(Time < P1 Invest year, 0, (("Treated Volume / D in P1" * ("Disassembly Income / t" - "Disassembly var. cost / t")) + ("Treated Volume / S in P1" * ("Shredding Income / t" - "Shredding var. cost / t")) + ("Treated Volume / H in P1" * ("Average Hydro income in P1 / t" - "Hydro var. cost / t")) + ("Treated Volume / D in P1" * "Recycling price in P1 / t") - ("D Fixed Cost/Unit" + "S Fixed Cost/Unit" + "H Fixed Cost/Unit")))	€ / an
NPV in P1	Level(PV in P1, -"D Invest/Unit" -"S Invest/Unit" -"H Invest/Unit")	€
Recycling price + Transport in P1 / t	"Recycling price in P1 / t" + "Transport Cost / t"	€ / t

Tableau B.34. Equations définissant les variables endogènes du bloc « CBA of Recycling ».

B.4.2.7 Bloc « CBA of Repurposing »

La figure suivante illustre le diagramme stock & flux de ce bloc de variables.

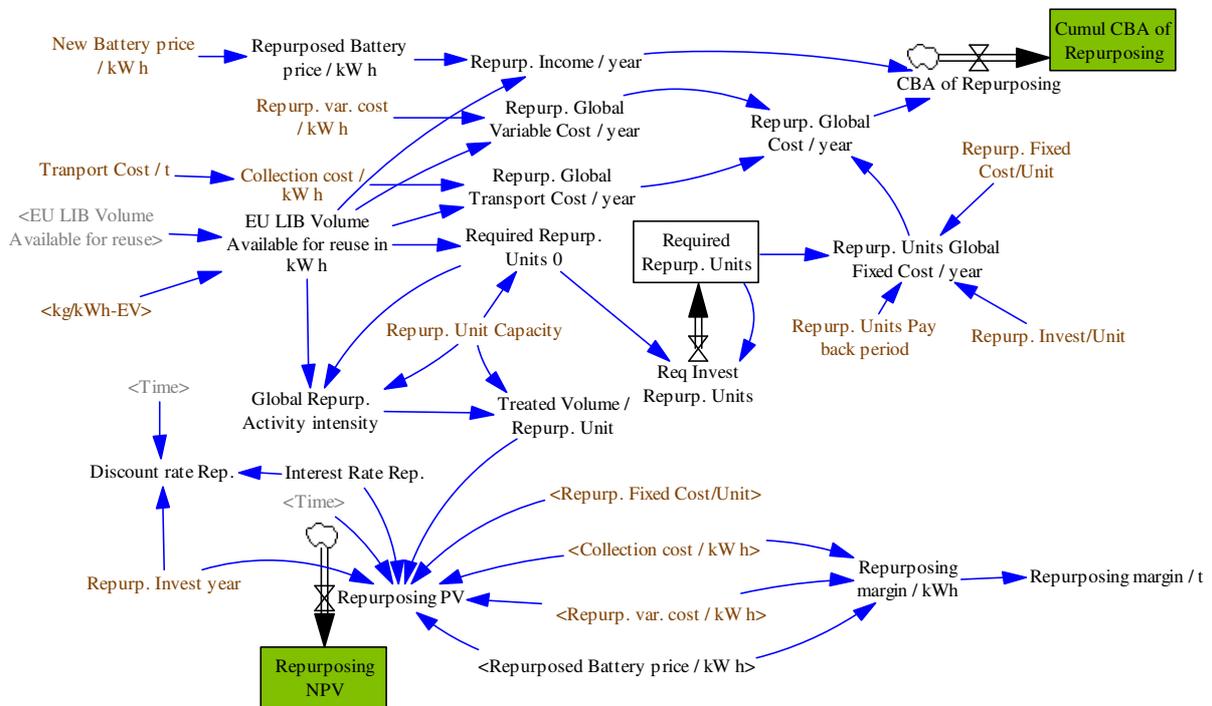


Figure B.19. Diagramme stock & flux du bloc « CBA of Repurposing ».

A l’instar du diagramme sur la rentabilité du recyclage (Figure B.18), nous calculons la différence coûts-bénéfices globale « *Cumul CBA of Repurposing* », pour l’analyse de

sensibilité (3.2.2.4), et la valeur actuelle nette dans le reconditionnement « *Repurposing NPV* ». Les éléments et étapes de calcul sont identiques au diagramme sur le recyclage, la seule différence est ce qui constitue les bénéfices. Ici, le bénéfice est indiqué par la variable « *Repurposed Battery price / kW h* », ce dernier est calculé en fonction du prix d'une batterie neuve (30%), comme nous l'avons vu à la section (B.4.1.7.4). Le tableau suivant récapitule les équations entre les variables endogènes.

Variable	Equation	Unité
EU LIB Volume Available for reuse in kW h	EU LIB Volume Available for reuse * 1000 / "kg/kWh-EV"	kWh
Required Repurp. Units 0	1+ INTEGER(EU LIB Volume Available for reuse in kW h / "Repurp. Unit Capacity")	Sans
Req Invest Repurp. Units	IF THEN ELSE("Required Repurp. Units 0" > "Required Repurp. Units", "Required Repurp. Units 0" - "Required Repurp. Units", 0)	Sans
Required Repurp. Units	Level ("Req Invest Repurp. Units", 0)	Sans
Repurp. Units Global Fixed Cost / year	"Required Repurp. Units" * (("Repurp. Invest/Unit" / "Repurp. Units Pay back period") + "Repurp. Fixed Cost/Unit")	€ / an
Repurp. Global Transport Cost / year	EU LIB Volume Available for reuse in kW h * "Collection cost / kW h"	€ / an
Repurp. Global Variable Cost / year	EU LIB Volume Available for reuse in kW h * "Repurp. var. cost / kW h"	€ / an
Repurp. Global Cost / year	"Repurp. Global Variable Cost / year" + "Repurp. Units Global Fixed Cost / year" + "Repurp. Global Transport Cost / year"	€ / an
Repurposed Battery price / kW h	"New Battery price / kW h" * 0.3	€ / kWh
Repurp. Income / year	EU LIB Volume Available for reuse in kW h * "Repurposed Battery price / kW h"	€ / an
CBA of Repurposing	Repurp. Income / year - "Repurp. Global Cost / year"	€ / an
Cumul CBA of Repurposing	Level (CBA of Repurposing, 0)	€
Global Repurp. Activity intensity	EU LIB Volume Available for reuse in kW h / ("Required Repurp. Units 0" * "Repurp. Unit Capacity")	%
Treated Volume / Repurp. Unit	Repurp. Unit Capacity * "Global Repurp. Activity intensity"	KWh
Discount rate Rep.	IF THEN ELSE(Time < "Repurp. Invest year", 1, (1+"Interest Rate Rep.")^("Repurp. Invest year"-Time))	%
Repurposing PV	IF THEN ELSE(Time < "Repurp. Invest year", 0, (("Treated Volume / Repurp. Unit" * ("Repurposed Battery price / kW h" - "Repurp. var. cost / kW h" - "Collection cost / kW h")) - "Repurp. Fixed Cost/Unit") * ((1+"Interest Rate Rep.")^("Repurp. Invest year"-Time)))	€ / an
Repurposing NPV	Level (Repurposing PV, - "Repurp. Invest/Unit")	€
Repurposing margin / kWh	Repurposed Battery price / kW h - ("Collection cost / kW h" + "Repurp. var. cost / kW h")	€ / kWh
Repurposing margin / t	"Repurposing margin / kWh" * (1000 / "kg/kWh-EV")	€ / t

Tableau B.35. Equations définissant les variables endogènes du bloc « CBA of Repurposing ».

B.5 Test du modèle et Sensibilité des variables incertaines

B.5.1 Validation du modèle

La validation du modèle a pour but de s'assurer que le comportement combiné des variables et des dynamiques du modèle est représentatif du comportement pratique de la filière. Dans le processus d'élaboration d'un modèle DS introduit par (Sterman, 2000), la validation se fait à l'étape 4 (test du modèle). Le terme « test » est privilégié par l'auteur à celui de « validation », en argumentant qu'il faut rendre un modèle plus utile que vrai. Ainsi, le but de la validation est de détecter les incohérences d'un modèle afin de l'améliorer.

A travers la littérature de la dynamique des systèmes, Sterman (2000) a identifié 11 tests possibles pour l'amélioration d'un modèle DS (adéquation de l'horizon temporel, adéquation avec le comportement passé du système, plausibilité du comportement aux conditions extrêmes, analyse de sensibilité, etc.). Dans ce travail, nous avons concentré la validation sur la structure du modèle (le choix des variables, la construction des diagrammes causaux et stock & flux) et les données d'entrée. Ainsi, nous avons mis en œuvre quatre tests :

- **Evaluation de la structure du modèle** : pour mener ce test, nous nous sommes appuyés sur deux moyens : (i) l'expertise des experts que nous avons rencontrés, en leurs exposant et co-construisant les différents diagrammes (3.2.2.2), (ii) la comparaison avec les modèles DS disponibles en littérature, notamment sur la criticité des matières (Miedema and Moll, 2013; Novinsky et al., 2014).
- **Conditions extrêmes** : ce test a pour but de s'assurer, d'une part, que les équations entre les variables restent valables même lorsqu'elles sont à leurs valeurs extrêmes et, d'autre part, que la réponse du système soit plausible dans ces conditions extrêmes. Cette technique a été principalement utilisée dans les blocs du modèle concernant la criticité et la technologie de recyclage. En augmentant ou diminuant considérablement la criticité ou le taux de recyclage d'une matière, nous avons observé l'activation et l'inactivation des boucles de rétroaction entre ces deux blocs.
- **Analyse de sensibilité** : en plus de l'identification des variables clés (3.2.2.4), l'analyse de sensibilité est aussi un moyen de test du modèle, en observant la plausibilité de son comportement dans plus de situations. A titre d'exemples, la perte de la rentabilité du reconditionnement avec la diminution des variables « Trans. cost for repurposing » et « New LIB price » (Figure B.34) ou, le faible effet de la variable « % LIB in HEV », vu le poids de la batterie HEV (Figure B.28).

- **La cohérence dimensionnelle** : il s'agit d'un outil disponible sur le logiciel de simulation *Vensim*. Il inspecte l'ensemble des équations déclarées dans le modèle pour détecter d'éventuelles erreurs d'unités.

Enfin, Sterman (2000) ajoute qu'un modèle doit être disponible pour sa critique et sa réplique. C'est pour cette raison que nous avons été exhaustifs et détaillés dans notre présentation des différents diagrammes et variables du modèle.

B.5.2 Graphiques de sensibilité des variables exogènes incertaines

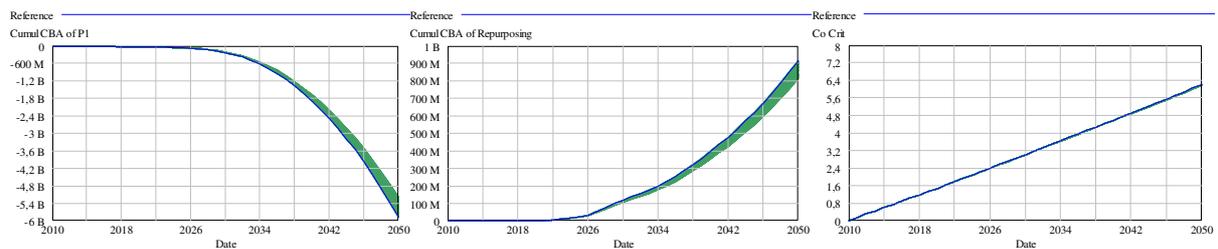


Figure B.20. Sensibilité par rapport à la variable « EU fleet ».



Figure B.21. Sensibilité par rapport à la variable « xEV penetration rate ».

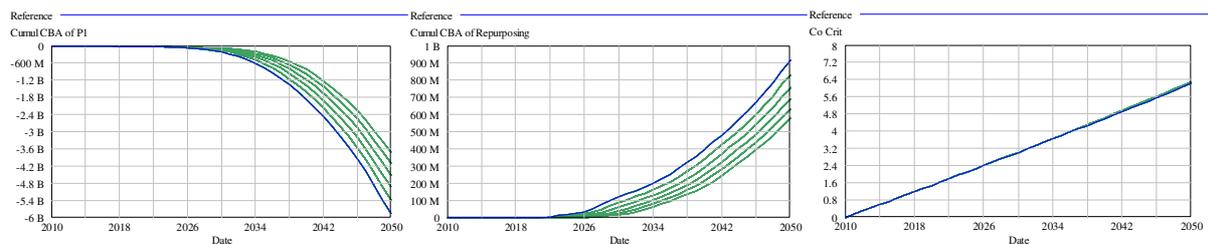


Figure B.22. Sensibilité par rapport à la variable « LIB Lifetime ».

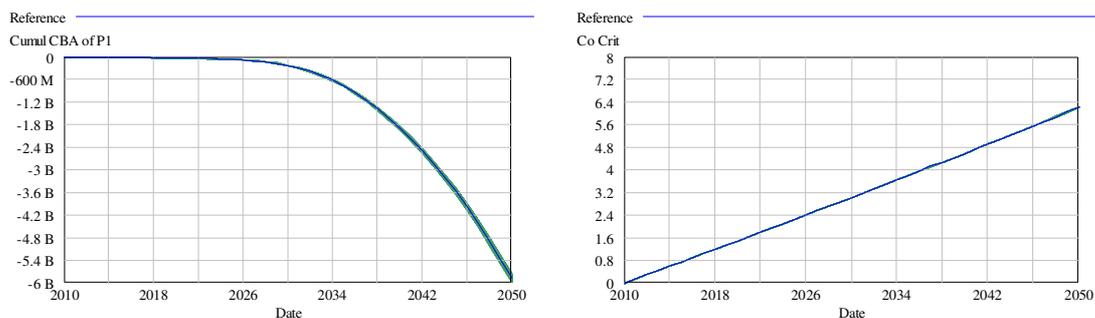


Figure B.23. Sensibilité par rapport à la variable « Failure rate ».

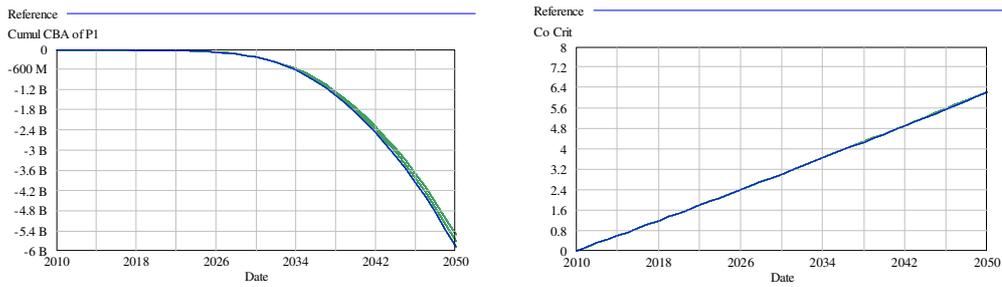


Figure B.24. Sensibilité par rapport à la variable « 2nd Life LIB Lifetime ».

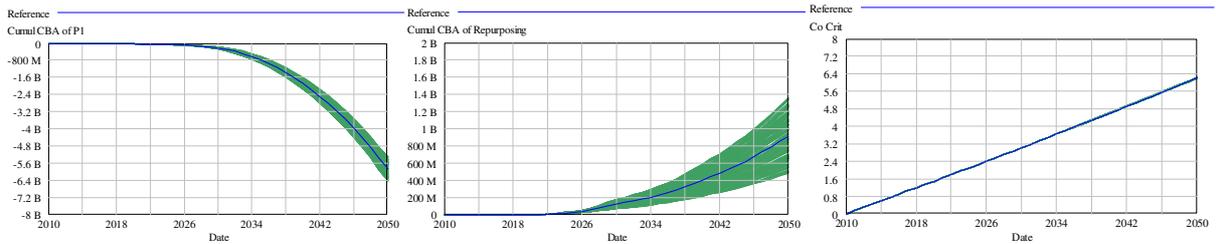


Figure B.25. Sensibilité par rapport à la variable « % 2nd life ».

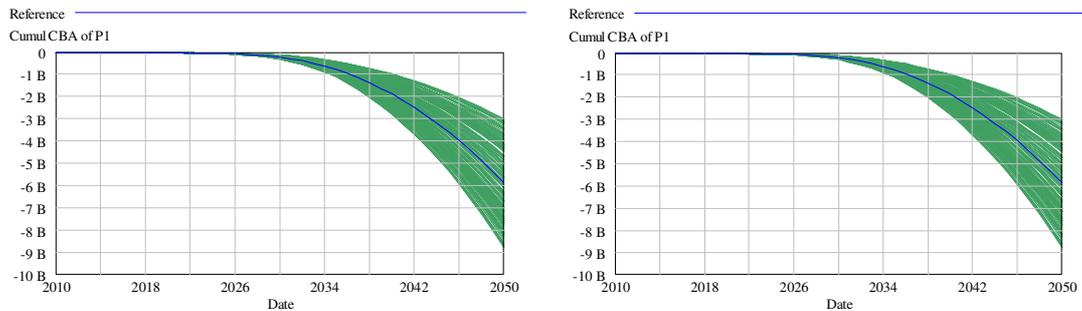


Figure B.26. Sensibilité par rapport à la variable « % P1 ».

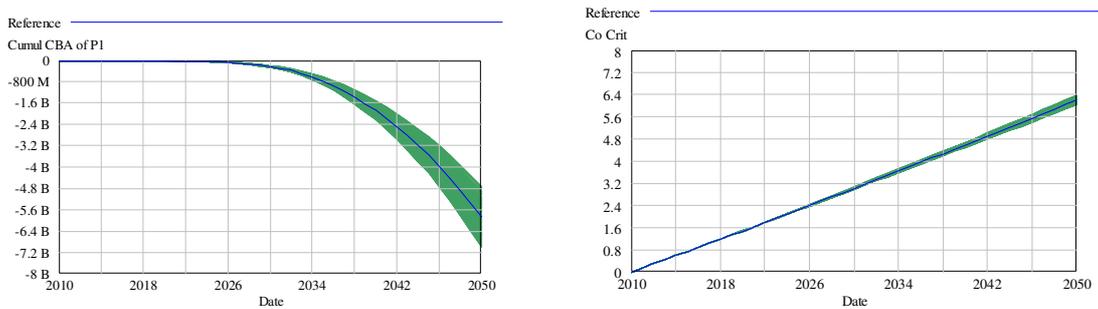


Figure B.27. Sensibilité par rapport à la variable « % NMC ».

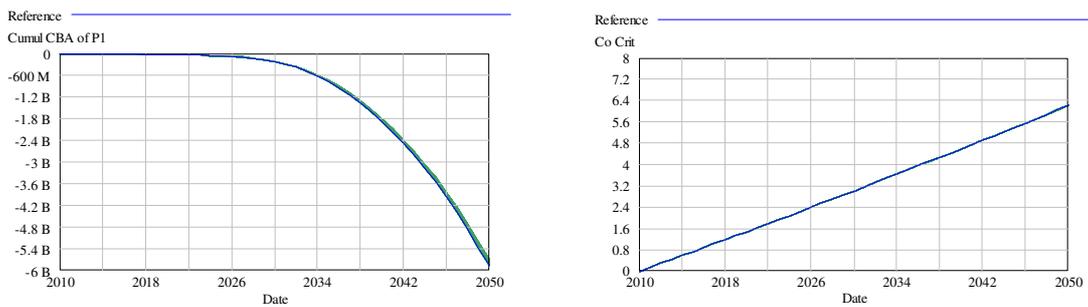


Figure B.28. Sensibilité par rapport à la variable « % LIB in HEV ».

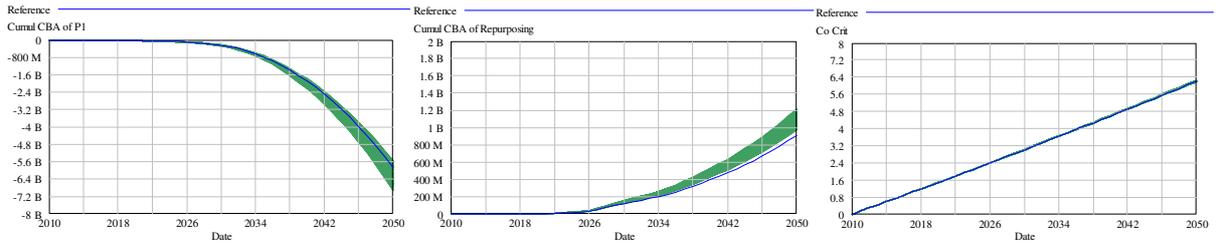


Figure B.29. Sensibilité par rapport à la variable «xEV LIB capacity ».

Figure B.30. Sensibilité par rapport à la variable «Other Co demand ».

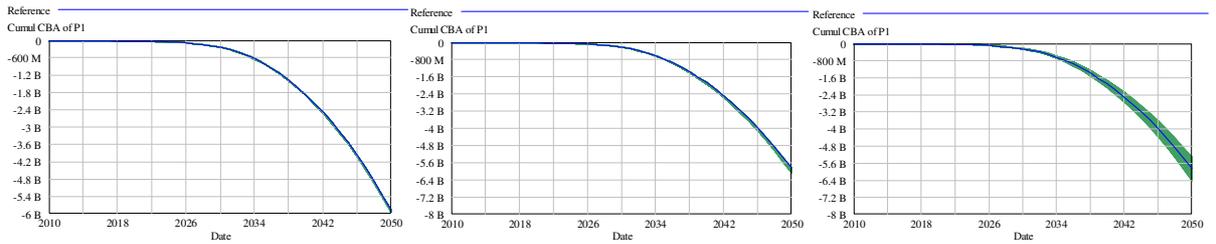


Figure B.31. Sensibilité par rapport aux variables « Investment cost in process P1 », « Fixed cost in process P1 » et « Variable cost in process P1 »..

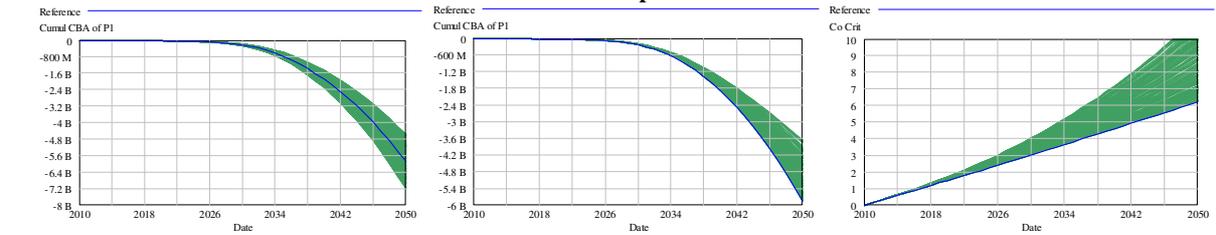


Figure B.32. Sensibilité par rapport aux variables « Trans. cost for recycling », « Co price » et «Other Co demand ».

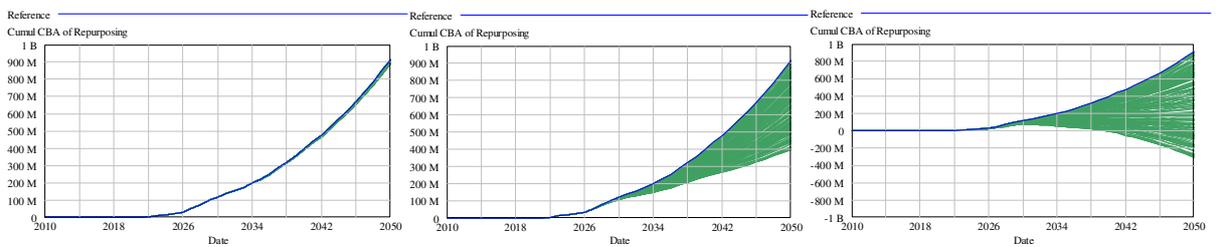


Figure B.33. Sensibilité par rapport aux variables « Investment cost in repurposing », « Fixed cost in repurposing » et « Variable cost in repurposing ».

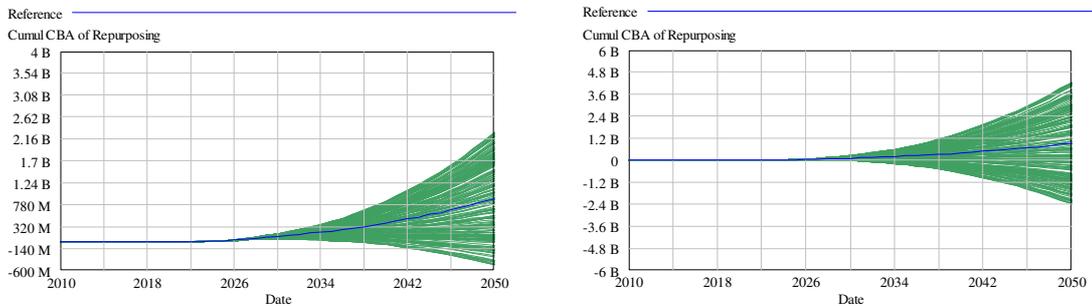


Figure B.34. Sensibilité par rapport aux variables « Trans. cost for repurposing » et « New LIB price ».

C. Annexes chapitre 4 (Prospective)

C.1 Analyse des procédés de recyclage

Dans cette annexe, nous illustrons quelques hypothèses et résultats relatifs à l'analyse des procédés de recyclage (4.3).

C.1.1 Prix de revente des matières recyclées

Dans cette section, nous analysons l'historique d'évolution des métaux afin d'adopter une hypothèse quant à leur évolution.

D'une manière générale, le prix des marchandises (métaux, pétrole, etc.) a fortement augmenté au début de ce siècle. Il s'agit du troisième boom depuis la fin de la seconde guerre mondiale : début des années cinquante (1950-1951), début des années soixante-dix (1973-1974) et entre 2003 et 2008 (Radetzki, 2006). Ce dernier boom était le plus puissant et durable parmi les trois (Radetzki et al., 2008), il est survenu après la dépression des prix depuis les années quatre-vingts (Figure C.1, Figure C.2).

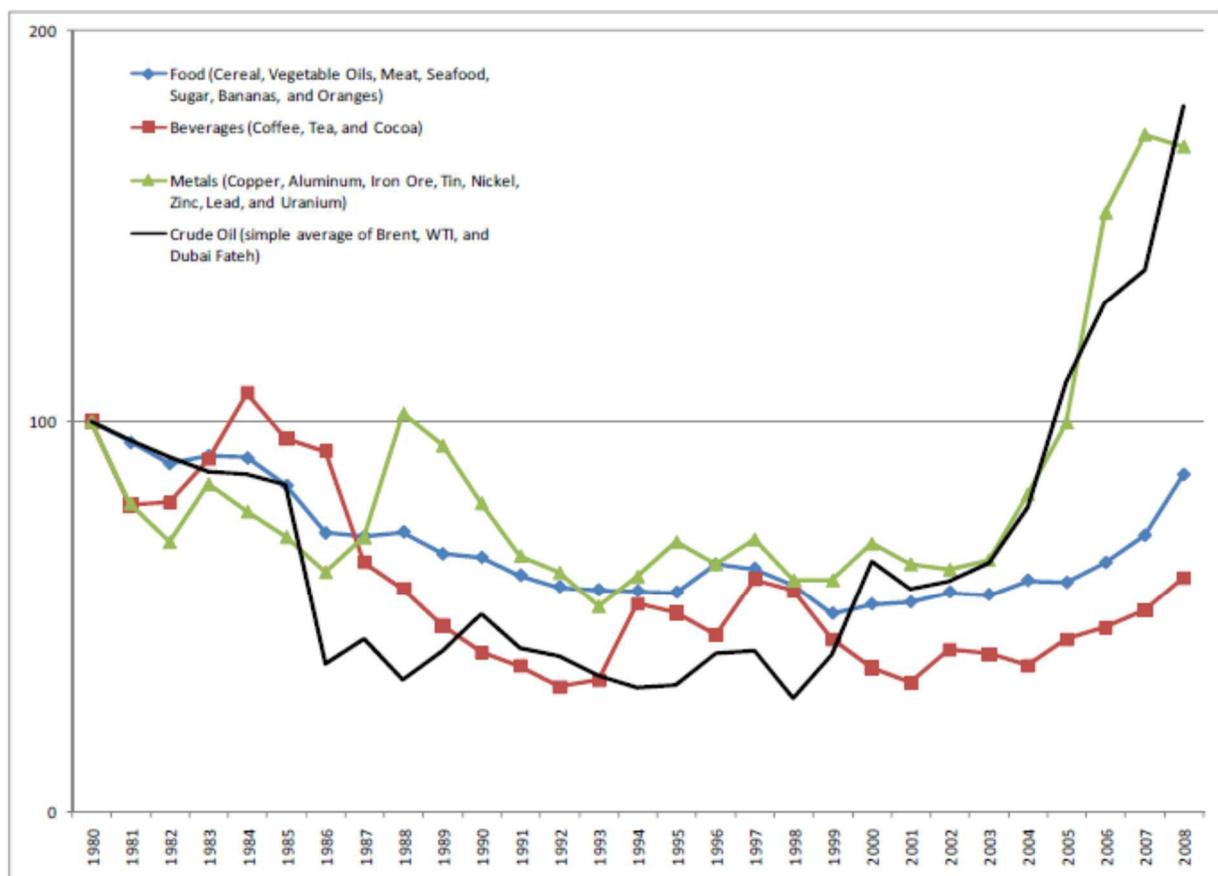


Figure C.1. Evolution du prix des marchandises depuis 1980 (Conceição and Marone, 2008).

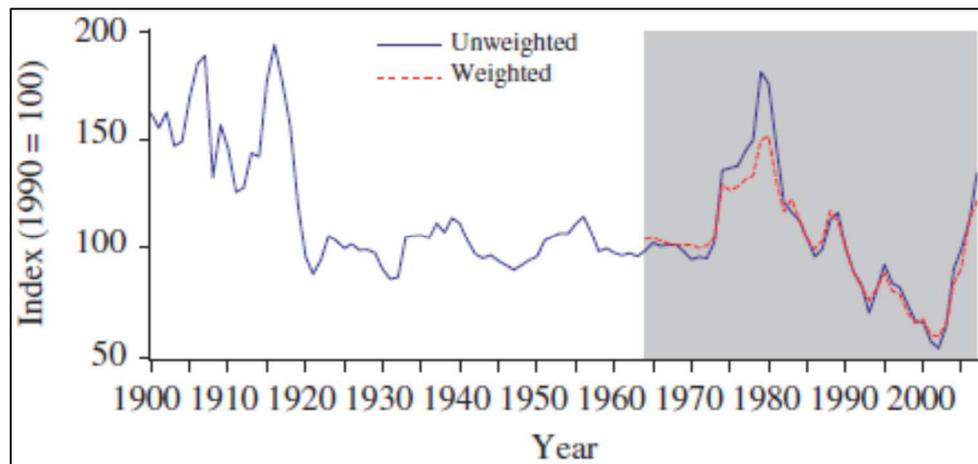


Figure C.2. Evolution du prix des métaux depuis 1900 (Chen, 2010).

Le boom des années 2000s a été causé principalement par la demande depuis les pays émergents, la Chine principalement (Chen, 2010; Radetzki, 2006; Radetzki et al., 2008). Son déclin a été précipité par la crise de 2008. A l'instar des booms précédents, l'augmentation des prix des métaux a commencé à se résorber. Il est probable qu'après ce dernier boom, l'industrie des métaux et minière rentrent dans une nouvelle phase (Humphreys, 2010). Par conséquent, les prix vont se stabiliser à un nouveau niveau.

En ce qui concerne les matières contenues dans la BLI, nous avons analysé l'évolution des prix LME (London Metal Exchange) des trois matières principales dans le revenu de recyclage, à savoir : le cuivre, le nickel et le cobalt (4.3.2). Dans la figure suivante, nous avons reporté l'évolution des prix LME de ces trois matières depuis 2000 (prix 2010 = 100).

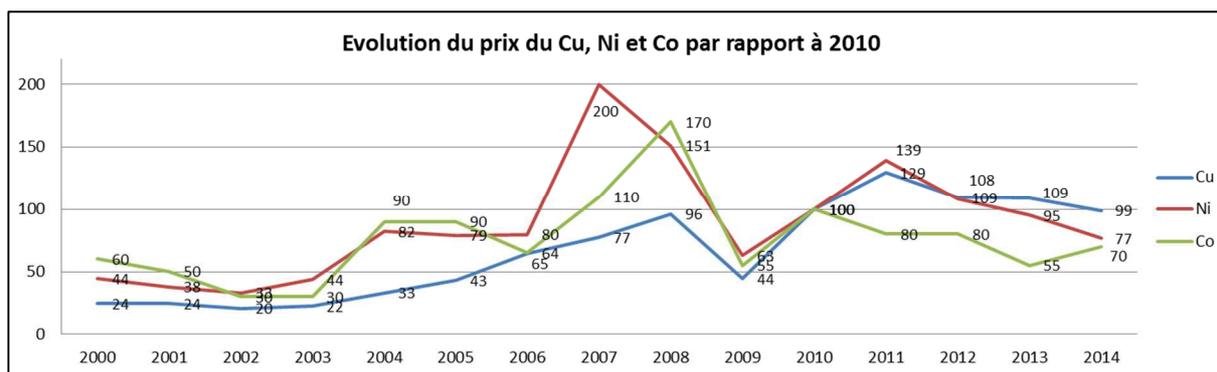


Figure C.3. Prix du cuivre, nickel et cobalt rapporté à celui de 2010. Source : LME.

Sur la figure, nous retrouvons l'ensemble des tendances précitées : forte augmentation à partir de 2003, diminution en 2008, puis fluctuations légères autour du prix 2010. Dans l'avenir, les prix de ces trois matières, ainsi que le reste des matières contenues dans la BLI, vont certainement continuer à fluctuer, avec probablement de nouveaux cycles d'augmentation, puis de résorption.

Considérant la difficulté de prévoir ces futurs prix, nous avons considéré; comme valeurs de références dans les six scénarios, des prix fixes correspondant à ceux de 2010. Il s'agit d'une simplification reposant sur l'hypothèse que les périodes d'augmentation (par rapport au prix 2010) vont compenser pour les périodes de diminution (par rapport au prix 2010). Toutefois, nous avons procédé à une analyse de sensibilité par rapport à ces prix (4.3.3.2).

Nous rappelons les prix de reventes 'référence' des matières recyclées au tableau ci-dessus.

	Acier	Plastique	Cu	Al	Li	Ni	Mn	Co	Fe	P	C
€/Tonne	200	250	4 600	1 350	705	11 246	1 406	18 743	500	70	-

Tableau C.1. Prix de revente 'référence' des matières recyclées.

C.1.2 Contribution des opérations élémentaires

Dans cette section, nous illustrons la contribution des trois opérations élémentaires de chaque procédé aux revenus et taux de recyclage.

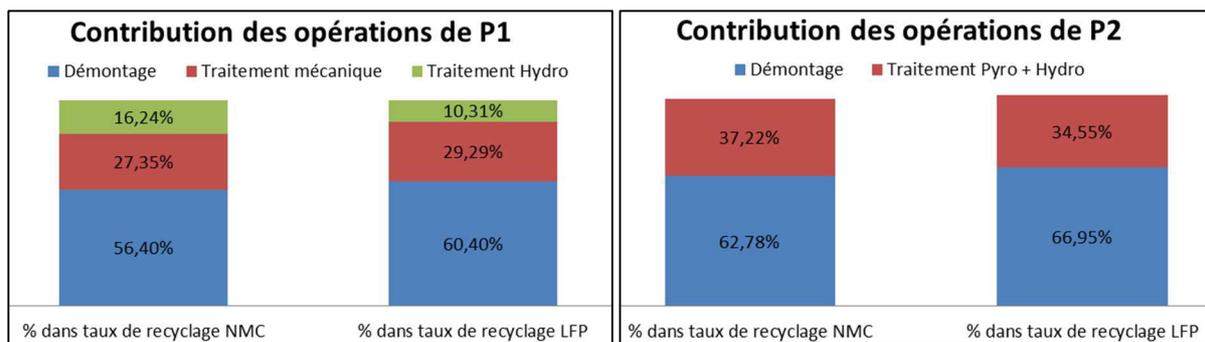


Figure C.4. Contribution des opérations du procédé P1 et P2 aux taux de recyclage des BLIs NMC & LFP.

Dans les deux procédés, le démontage contribue à plus de la moitié du taux de recyclage. C'est l'hydrométallurgie qui y contribue le moins, comme nous l'avons vu avec la contribution des matières de la masse active positive (Figure 4.13).

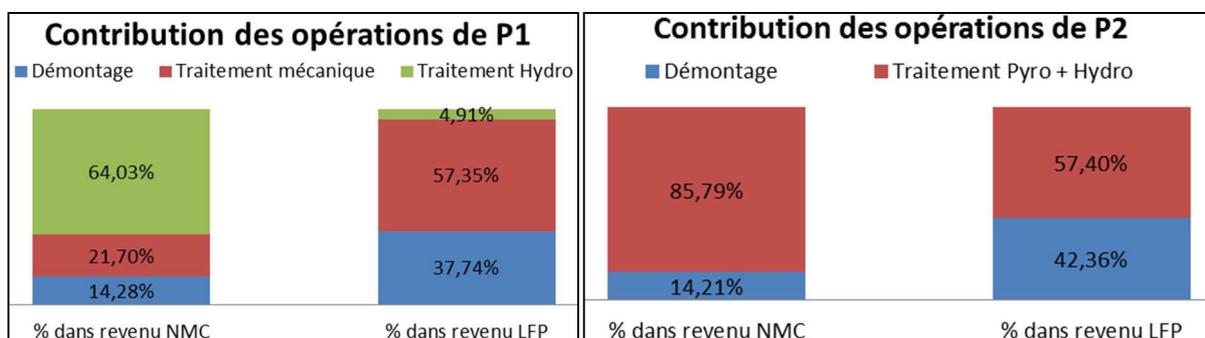


Figure C.5. Contribution des opérations du procédé P1 et P2 aux revenus de recyclage des BLIs NMC & LFP.

Concernant les revenus, c'est les deux dernières opérations (Traitement mécanique + Hydrométallurgie ; Pyrométallurgie + Hydrométallurgie) qui y contribuent le plus.

La filière de valorisation des batteries de véhicules électriques en fin de vie. Contribution à la modélisation d'un système organisationnel complexe en émergence

Avec le développement des véhicules électriques, la question de la valorisation des batteries lithium-ion (BLI) se pose pour diverses raisons. Pourtant, une filière de valorisation structurée n'existe pas aujourd'hui. Notre travail académique a pour objet l'étude de cette dernière. La filière de valorisation des BLIs est définie comme un système sociotechnique, complexe en émergence. Notre problématique consiste alors à l'étudier d'un point de vue technico-économique, organisationnel et prospectif et ce en tenant compte des différentes complexités. Cette problématique soulève trois questions de recherche : Comment modéliser la filière de valorisation des BLIs comme un système organisationnel complexe en émergence ? Comment faire de la prospective sur la filière de valorisation des BLIs ? Comment analyser la gouvernance de la filière de valorisation des BLIs ?

Pour modéliser la filière de valorisation des BLIs, nous mettons en œuvre d'une manière combinée trois méthodes de modélisation systémiques : SCOS'M (*Systemics for Complex Organisational Systems' Modelling*), la cartographie cognitive et la dynamique des systèmes. La modélisation a pour objectif la caractérisation de la filière (parties prenantes, sous-systèmes ...), la compréhension de ses dynamiques d'évolution et l'identification des variables clés dans ces dynamiques. Cette modélisation est une base pour la suite.

Pour faire de la prospective sur la filière de valorisation des BLIs, nous préconisons l'utilisation des scénarios. Ces derniers sont définis à l'aide de la matrice SRI (*Stranford Research Institute*), en exploitant les variables clés qui interviennent dans les dynamiques d'évolution de la filière. La prospective est permise en simulant le modèle dynamique des systèmes avec différents scénarios, afin d'analyser les aspects technico-économiques.

Pour l'étude de la gouvernance de la filière de valorisation des BLIs, le périmètre a été restreint à l'activité de reconditionnement. Dans ce cas, l'étude de la gouvernance revient à analyser des combinaisons de répartition (application 2nd vie, partie prenante). Une méthodologie d'aide à la décision a été développée pour cette fin.

D'une manière générale, cette thèse a identifié les enjeux et questions qui se posent lors de l'étude de la valorisation des batteries lithium-ion des véhicules électriques. A travers notre modélisation, nous avons établi une base d'analyse utile à l'aide à la décision. Nous avons répondu à certaines questions (aspects technico-économiques et organisationnels) et ouvert la voie pour d'autres (aspects logistiques et environnementaux).

Mots clés : Véhicule électrique, batterie lithium-ion, recyclage, reconditionnement, 2nd vie, système complexe.

The recovery network of end-of-life batteries from electric vehicles. Contribution to the modeling of an emerging complex organizational system

With the development of electric vehicles, the recovery of lithium-ion batteries (LIB) arises for various reasons. However, a structured recovery network does not exist today. Our academic work aims to study this latter. The LIBs recovery network is defined as a socio-technical complex emerging system. Our problematic is then to study it from a technical-economic, organizational and prospective perspective, taking into account the different complexities. This problematic raises three research questions: How to model the LIBs recovery network as a complex organizational emerging system? How to foresight on the LIBs recovery network? How to analyze the LIBs recovery network governance?

To model the LIBs recovery network, we apply with combination three systemic modeling methods: SCOS'M (*Systemics for Complex Organisational Systems' Modelling*), cognitive mapping and system dynamics. The modeling aims to characterize the recovery network (stakeholders, subsystems ...), understand its dynamics and identify the key variables in these dynamics. This model is the basis for the following research questions.

To Foresight on the LIBs recovery network, we recommend the use of scenarios. These are defined using the SRI matrix (*Stranford Research Institute*), exploiting the key variables. Foresight is permitted by simulating the system dynamics model with different scenarios to analyze the technical-economic aspects.

For the study of the LIBs recovery network governance, the scope was restricted to the repurposing activity. In this case, the study of the governance comes down to analyzing the combinations (2nd life application, stakeholder). A decision aid methodology has been developed for this purpose.

In general, this thesis identified the questions that arise when considering the recovery of LIBs. Through our modeling, we have established a useful basis for decision aid. We answered some questions (technical-economic and organizational aspects) and paved the way for others (logistical and environmental aspects).

Mots clés : Electric vehicle, lithium-ion battery, recycling, repurposing, 2nd life, complex system.